

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

FERNÃO MARCELO MONTEIRO

CONTROLE DE TEMPERATURA COM PID EM CHUVEIRO
RESIDENCIAL

São Carlos

2020

FERNÃO MARCELO MONTEIRO

CONTROLE DE TEMPERATURA COM PID EM CHUVEIRO
RESIDENCIAL

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecatrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Prof. Dr. Mário Luiz Tronco

São Carlos

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M772c Monteiro, Fernão Marcelo
 Controle de Temperatura com PID em Chuveiro
 Residencial / Fernão Marcelo Monteiro; orientador Mário
 Luiz Tronco. São Carlos, 2020.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica)
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, 2020.

1. Controle de potência. 2. Ângulo de fase. 3.
Passagem por zero. 4. Chuveiro digital. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: FERNÃO MARCELO MONTEIRO

Título:

CONTROLE DE TEMPERATURA COM PID EM CHUVEIRO RESIDENCIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA

Professor Mário Luiz Tronco
(Orientador)

Nota atribuída: 8 (Oito)



(assinatura)

Professora Maira Martins Silva

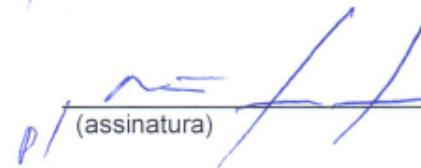
Nota atribuída: 8 (Oito)



(assinatura)

Lenardo Bonacini

Nota atribuída: 8 (Oito)



(assinatura)

Média: 8 (Oito)

Resultado: Aprovado

Data: 08/12/2020.

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM NÃO Visto do orientador



DEDICATÓRIA

Aos meus pais Maurício e Maria do Carmo, à minha irmã Marina, e a todos que me auxiliaram e de alguma forma contribuíram positivamente na minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e saúde para trilhar o caminho do conhecimento e desenvolvimento.

Aos meus pais que sempre me apoiaram e me sustentaram com amor e dedicação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mário Luiz Tronco por suas valiosas contribuições neste projeto.

Aos meus professores do curso de Engenharia Mecatrônica pela competência e qualidade do ensino.

À USP e a todos os seus colaboradores pelos serviços prestados.

Aos meus amigos pelo convívio e aprendizado mútuo durante o curso de graduação.

RESUMO

MONTEIRO, F. M. Controle de Temperatura com PID em Chuveiro Residencial. 2020. 48p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Na atualidade existe um desperdício de água e energia nas residências, principalmente durante o uso de chuveiros elétricos, que pode ser atenuada com aplicações de tecnologias para otimizar os processos de aquecimento e controle de temperatura da água. Neste sentido, o presente projeto visa à sustentabilidade, por meio do desenvolvimento de um adaptador para controle automático da temperatura da água, a fim de conservar recursos naturais. Com o controle fino da temperatura aplicado aos chuveiros elétricos, é possível diminuir o gasto total de energia residencial, bem como a diminuição do desperdício de água, além de proporcionar um bem estar maior às pessoas com um custo viável. A abordagem utilizada neste estudo foi em montar um circuito de controle de potência utilizando o microcontrolador Arduino com um sistema PID para realizar o controle da temperatura da água automaticamente, além de disponibilizar para o usuário a seleção da temperatura desejada e a leitura da mesma. Os testes do circuito para confirmar o funcionamento dos componentes elétricos foram feitos no Proteus, e o código de programação do Arduino foi testado separadamente em cada componente, podendo assim garantir um bom funcionamento em testes futuros.

Palavras-chave: Controle de potência. Ângulo de fase. Passagem por zero. Chuveiro digital.

ABSTRACT

MONTEIRO, F. M. Temperature Control with PID in Residential Shower. 2020. 48p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Nowadays, there is a waste of water and energy in homes, mainly during the use of electric showers, which can be mitigated with applications of technologies to optimize the processes of heating and water temperature control. In this sense, this project aims at sustainability, through the development of an adapter for automatic water temperature control, in order to conserve natural resources. With fine temperature control applied to electric showers, it is possible to decrease the total expenditure of residential energy, as well as the reduction of water waste, in addition to providing greater well-being to people at a viable cost. The approach used in this study was to set up a power control circuit using the Arduino microcontroller with a PID system to automate the temperature control, in addition to providing the user with the selection of a desired temperature and its reading. The circuit tests to confirm the functioning of the electrical components were made on Proteus, and the Arduino programming code was tested separately on each component, thus being able to guarantee a good functioning in future tests.

Keywords: Potency control. Phase Angle. Zero cross. Digital Shower.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	2
1.1.	Considerações Iniciais	2
1.2.	Objetivos	3
1.3.	Estrutura da Monografia.....	4
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1.	Componentes Eletrônicos.....	5
2.1.1.	Microcontrolador.....	5
2.1.2.	Sensor de temperatura	6
2.1.3.	Amplificador Operacional.....	10
2.1.4.	Acoplador óptico	13
2.2.	Controle de potência.....	14
2.2.1.	Detector de passagem por zero.....	16
2.2.2.	Acionamento de cargas por ângulo de fase	17
2.2.3.	Programação de controle	19
2.3.	Estado da Arte	20
3.	PROJETO DESENVOLVIDO.....	22
3.1.	Esquemático do Projeto.....	22
3.2.	Componentes, Circuitos e Programação	25
3.2.1.	Arduino Uno.....	26
3.2.2.	Sensor de Temperatura.....	26
3.2.3.	Detector de Passagem por Zero.....	28
3.2.4.	Controle de Ângulo de Fase	31
3.2.5.	Interface do Usuário	33
3.2.6.	Lógica de Controle Proporcional-Integral-Derivativo	34
4.	TESTES E RESULTADOS	37
5.	CONCLUSÕES.....	45
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

Com a contínua necessidade de aprimoramento e automatização na produção industrial, faz-se necessário a melhoria do controle das máquinas utilizadas. Esses processos de controle são essenciais para uma resposta mais rápida do sistema a partir de leituras feitas por aparelhos de medição, a fim de minimizar a diferença dos erros obtidos nos processos e consequentemente um produto final menos variado.

A automatização do controle da temperatura, neste trabalho, vem da necessidade de diminuir os gastos de energia elétrica do chuveiro, quando se esquenta a água mais do que o necessário, ou até mesmo diminuir os gastos de água quando se possui um aquecedor solar e é preciso esperar a água esquentar antes de iniciar o uso.

Em uma análise mais abrangente, com esta automatização é possível considerar a diminuição do impacto ambiental considerando a necessidade de construção de usinas hidrelétricas, eólicas, termonucleares e térmicas, para atender toda a demanda de consumo da população, com consequente impactos ao meio ambiente.

1.1. Considerações Iniciais

Com o aumento da utilização de água e energia elétrica por cada vez mais usuários, as fornecedoras de energia cobram cada vez mais caro pelos seus serviços, afetando todos os brasileiros. Nas residências, esses dois gastos são indispensáveis e dificilmente é possível diminuí-los sem utilizar outros meios de fornecimento. Este projeto foi pensado na possibilidade de diminuir tanto a conta de energia elétrica quanto a conta de água.

Este trabalho consiste na proposta de um dispositivo para controle automático da temperatura da água de chuveiros residenciais, com a finalidade de economizar recursos naturais e melhorar a experiência do usuário.

Existem várias técnicas de controle para a estabilização e minimização de erros em um determinado processo. Um dos conjuntos de técnicas mais utilizadas é o Controle Proporcional Integral Derivativo (PID). Utilizando-se deste processo, o programador pode automatizar um processo com certa facilidade e precisão. No presente projeto, a

implementação desta estratégia de controle foi realizada utilizando a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino.

Além do chuveiro, o mesmo projeto pode ser adaptado em vários sistemas básicos de aquecimento, onde seja possível colocar um sensor para monitoramento da temperatura. Apesar de outros projetos serem afetados de diferentes formas por um sistema de aquecimento, o princípio de funcionamento é o mesmo, o que significa que a adaptação é possível desde que haja ajustes suficientes para erro obtido no processo seja aceitável.

1.2. Objetivos

O objetivo principal neste projeto foi a proposta de um produto para redução dos gastos de energia e água em chuveiros elétricos e eletrônicos.

Este produto consiste em um dispositivo adaptável em chuveiros, para controle automático da temperatura a partir da seleção da mesma pelo usuário.

Com o controle mais rápido da temperatura desejada, existe a diminuição dos gastos de água e energia. Também para quem possui as placas de aquecimento solar, há um ganho significativo no tempo para a estabilização da temperatura, usando o dispositivo misturador. Neste caso, utilizando energia elétrica, há um aumento mais rápido da temperatura da água, que previamente estava fria por estar nos encanamentos e não no reservatório quente. Com este controle é possível controlar de forma melhor a temperatura da água, diminuindo assim o tempo para iniciar o banho.

Para o controle da temperatura é proposto um circuito de controle de corrente, utilizando um controle PID para acionar um tiristor, a fim de automatizar o sistema.

Este tiristor é acionado por pulsos provenientes do arduino, que ao receber as informações do sensor de temperatura, controla a quantidade de potência da rede elétrica que é aplicada ao circuito do chuveiro.

A vantagem para quem possui as placas de aquecimento solar se dá ao diminuir o desperdício de água enquanto a temperatura aumenta até um nível confortável para o banho.

A consequência de um chuveiro automatizado é a diminuição do uso de energia elétrica, e principalmente de água, além de prover um conforto maior ao usuário devido à estabilidade da temperatura.

1.3. Estrutura da Monografia

Esta monografia foi estruturada em capítulos, os quais são descritos brevemente a seguir.

Capítulo 2 – Neste capítulo é descrito o funcionamento dos dispositivos elétricos e eletrônicos, bem como práticas de circuitos com finalidade específica para auxiliar no projeto, e o estado da arte. Estes dispositivos são: microcontrolador, sensor de temperatura, amplificador operacional, acoplador óptico, controle de potência, detector de passagem por zero, acionamento de cargas por ângulo de fase, programação de controle.

Capítulo 3 – Neste capítulo é descrito o caminho que foi utilizado para chegar ao resultado final. Além de apontar cada componente, contém os circuitos utilizados no funcionamento do projeto e a lógica de programação para cada parte do circuito.

Capítulo 4 – Neste capítulo são descritas as contas necessárias para cada componente do circuito, e simulações dos circuitos feitas no software Proteus.

Capítulo 5 – Neste capítulo são descritas as conclusões do projeto, e sugestões do que pode ser explorado para melhoria.

Capítulo 6 – Contém a bibliografia utilizada para obtenção da teoria e do funcionamento de cada componente do trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Diversos componentes eletrônicos fazem parte deste projeto. Portanto, uma breve descrição de cada um é mostrada no presente capítulo, assim como as principais técnicas de controle envolvidas.

2.1. Componentes Eletrônicos

2.1.1. Microcontrolador

O microcontrolador é como um pequeno computador. Possui memória, processador, armazenamento interno e interfaces de entrada e saída.

Microcontroladores são utilizados em vários tipos de sistemas embarcados, sejam projetos pequenos ou grandes. Estes componentes realizam operações que normalmente envolvem a interpretação de dados captados por dispositivos de entrada e posterior processamento e aplicação de ações específicas nos sistemas utilizados. São utilizados em uma grande variedade de projetos, como por exemplo, em sistemas inteligentes aplicados em automóveis, usinas de açúcar e álcool, indústrias e até projetos de pequeno porte, como automação residencial, controle de lâmpadas, e na “internet das coisas”.

Neste projeto é utilizado o Arduino Uno, por ser um projeto que não precisa de muito processamento, e consequentemente o uso de um microcontrolador mais simples é viável, diminuindo o custo geral do dispositivo.

Arduino is an open-source electronics platform based on easy-to-use hardware and software. Arduino boards are able to read inputs - light on a sensor, a finger on a button, or a Twitter message - and turn it into an output - activating a motor, turning on an LED, publishing something online. You can tell your board what to do by sending a set of instructions to the microcontroller on the board.¹

¹ <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

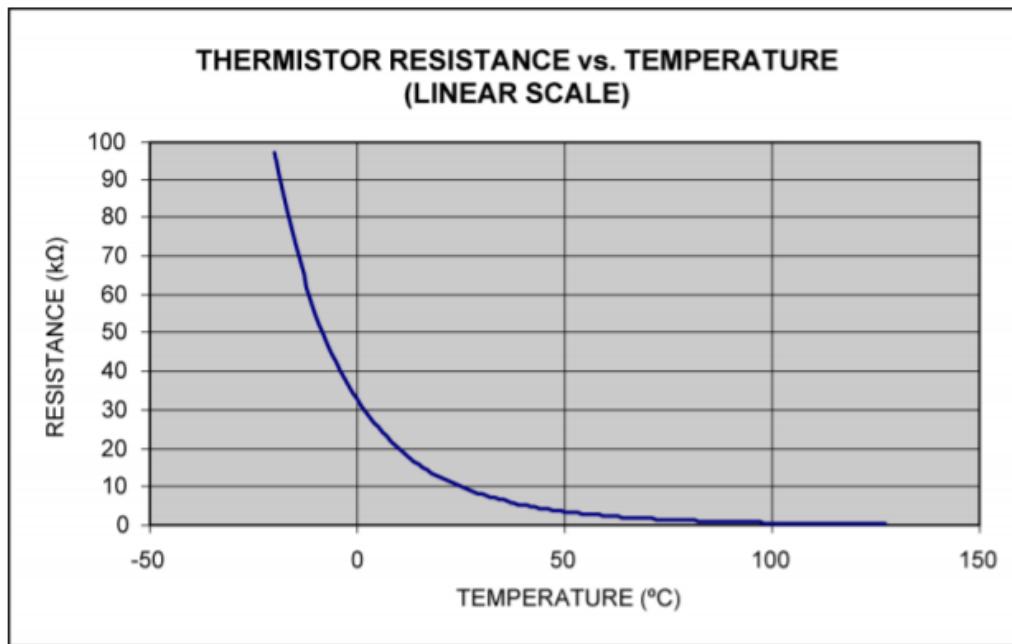
Como constatado, o arduino é uma plataforma eletrônica aberta, com hardware e software de fácil utilização. Para a implementação do código é utilizado o programa Arduino Software IDE, e a programação é feita na linguagem de arduino, baseada na linguagem de programação C++.

2.1.2. Sensor de temperatura

Existem vários dispositivos diferentes para medição de temperatura em um sistema. Entre estes podem ser citados como comumente usados: termistores, detectores de temperatura por resistência, termoacopladores, e detectores de temperatura de circuito integrado. Cada um desses métodos tem suas particularidades, limitações e funcionamento, que serão explicitados a seguir.

Os termistores são componentes resistivos que apresentam uma grande alteração de resistência proporcional a uma alteração pequena da temperatura. Comumente encontrados com o coeficiente de temperatura negativo (NTC). Geralmente tem um alcance moderado que chega a 150°C, apesar de alguns modelos apresentarem temperaturas maiores. Custo baixo a moderado, dependendo da precisão. Um gráfico exemplo de sua funcionalidade, ou seja, da variação da resistência em relação à temperatura, é ilustrado na Figura 1.

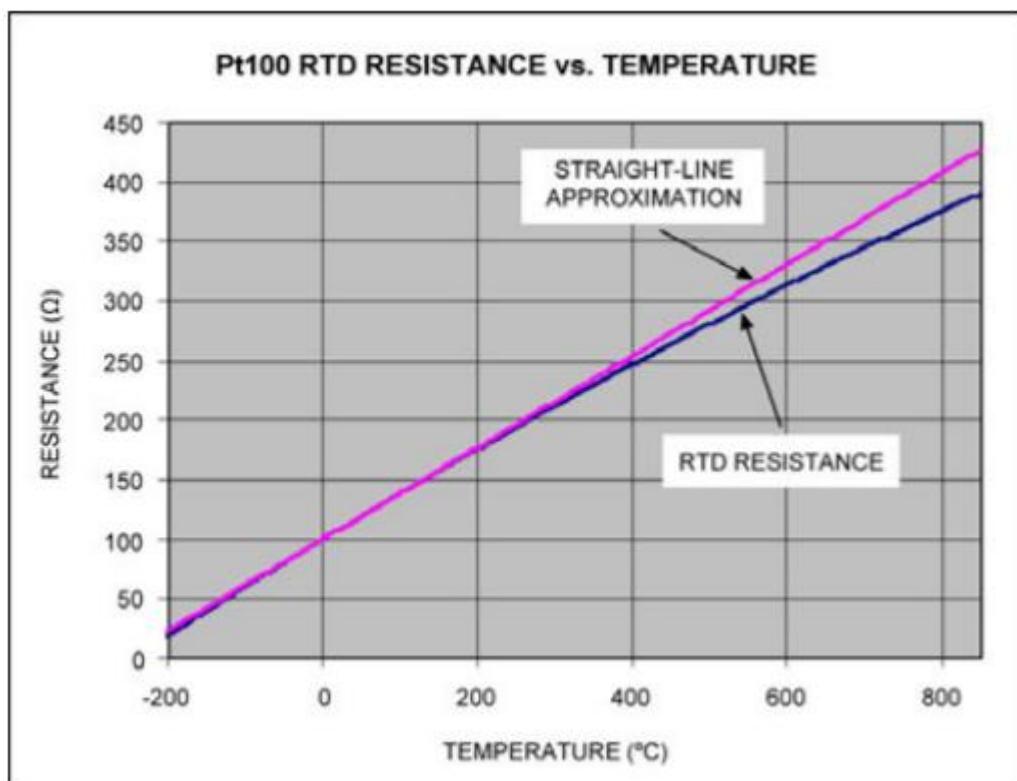
Figura 1 - Curva de resistência x temperatura de um sensor de temperatura termistor



Fonte: MAXIM INTEGRATED (2014).

Os detectores de temperatura por resistência (RTDs) são resistores cuja resistência varia com a temperatura. O material mais comumente utilizado é a platina, pois possui a maior precisão dentre os materiais utilizados. Suas características incluem alcance de temperatura de até 800°C, excelente precisão e uma linearidade aceitável da resistência com a temperatura. Um exemplo de um sensor RTD com a variação de temperatura por resistência é ilustrado na Figura 2.

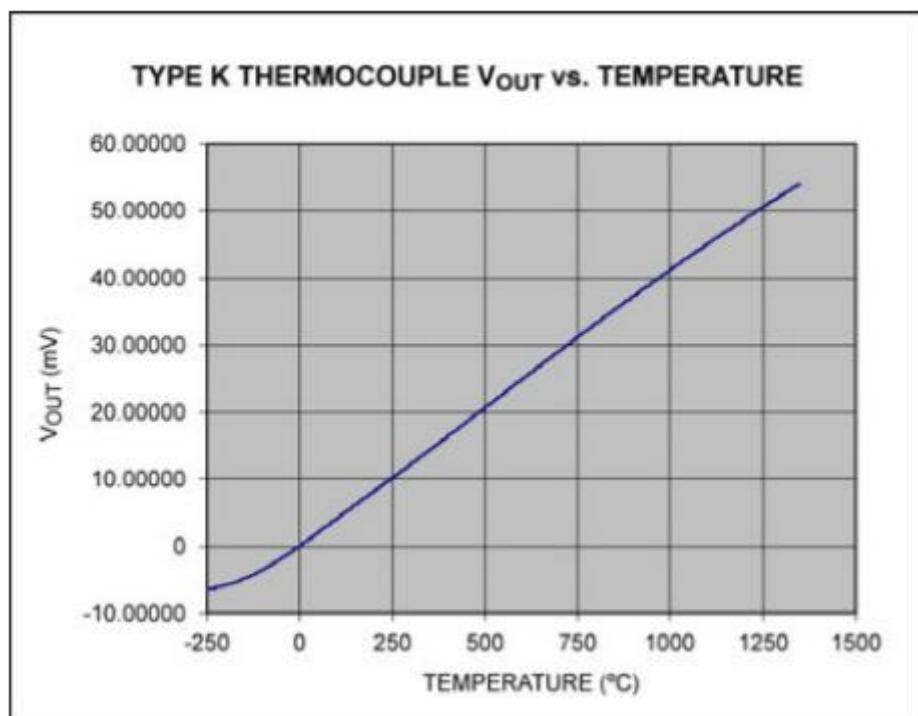
Figura 2 - Curva de resistência x temperatura de um sensor de temperatura RTD



Fonte: MAXIM INTEGRATED (2014).

Os termoacopladores são detectores de temperatura que funcionam pela variação de tensão na junção de dois fios de metais distintos. Ao variar a temperatura, a tensão gerada é aproximadamente proporcional à temperatura. Suas características incluem um alcance de temperatura de até 1800°C, custo baixo, tensão de saída muito baixa e linearidade aceitável. Um exemplo de um sensor termoacoplador é ilustrado na Figura 3.

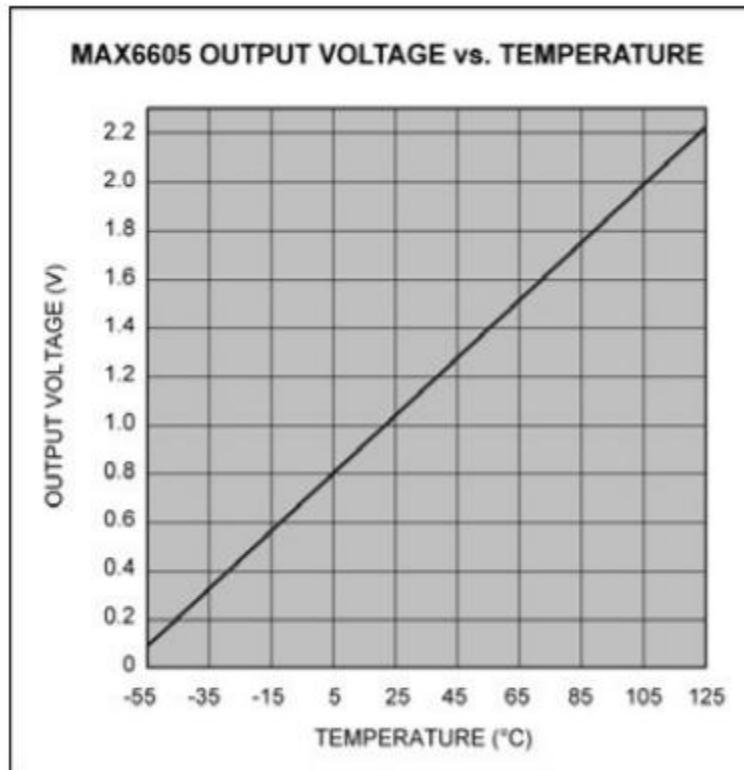
Figura 3 - Curva de tensão x temperatura de um sensor de temperatura termoacoplador



Fonte: MAXIM INTEGRATED (2014).

Os sensores de temperatura de circuito integrado (IC) apresentam funcionamento pela previsibilidade das características térmicas de junções PN de silício. Possuem variabilidade grande de formas e incluem recursos digitais que não podem ser observados em outras tecnologias. Os extremos das temperaturas de operação são -55°C e 150°C. Existem tanto sensores de funcionamento analógico quanto digital, onde o analógico transforma a leitura de temperatura em tensão ou corrente, enquanto o digital transforma a leitura de temperatura em um sinal digital. Uma curva de tensão por temperatura dos sensores analógicos é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Curva de tensão x temperatura de um sensor de temperatura IC analógico



Fonte: MAXIM INTEGRATED (2014).

2.1.3. Amplificador Operacional

“O Amplificador Operacional (AmpOp) é um amplificador CC multiestágio com entrada diferencial cujas características se aproximam das de um amplificador ideal.” (PERTENCE JUNIOR, 2003, p. 17)

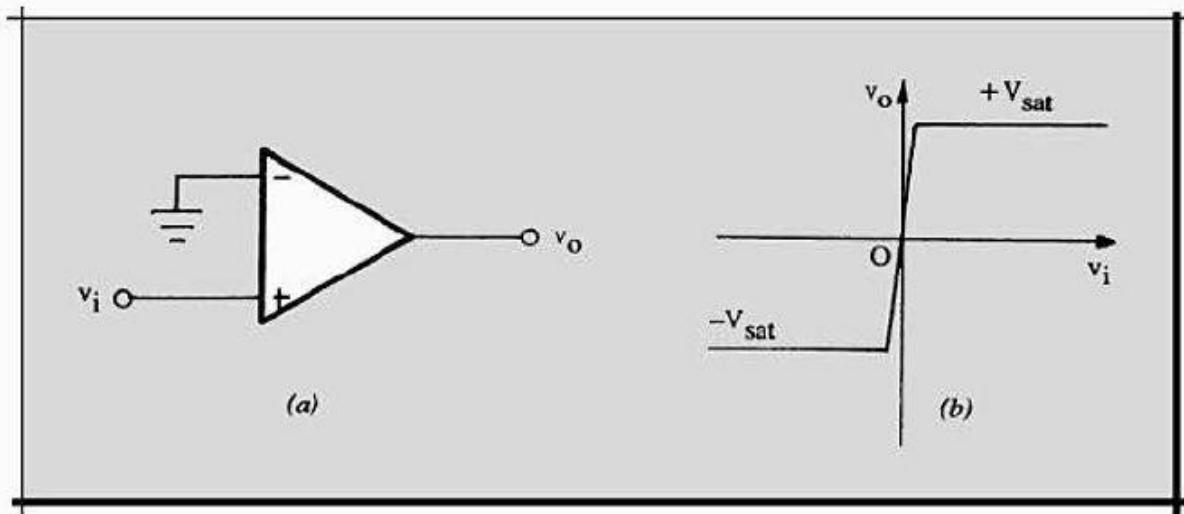
De acordo com Antonio Pertence Junior, as características ideais de um amplificador operacional são: resistência de entrada infinita, resistência de saída nula, ganho de tensão infinito, resposta de freqüência infinita, e insensibilidade à temperatura.

Um Amplificador Operacional pode trabalhar com realimentação positiva ou negativa ou sem realimentação. Com realimentação o circuito apresenta modo de operação de malha fechada e é possível controlar o ganho do amplificador operacional. Sem realimentação o ganho é fixo de acordo com o fabricante e o dispositivo é normalmente utilizado como comparador.

Como comparador, o amplificador operacional funciona com a diferença de tensão entre as duas entradas. Em uma entrada é colocada uma tensão a ser usada como referência, a qual pode ser manipulada com o uso de resistores. Na outra entrada, é aplicada a tensão a ser comparada, denominada tensão de entrada. Existem duas formas de utilizar um circuito comparador, como não inversor e inversor.

Na figura 5 é possível observar a ligação e a saída do comparador não inversor com a tensão de referência no terra, trabalhando no primeiro e no terceiro quadrantes do amplificador operacional.

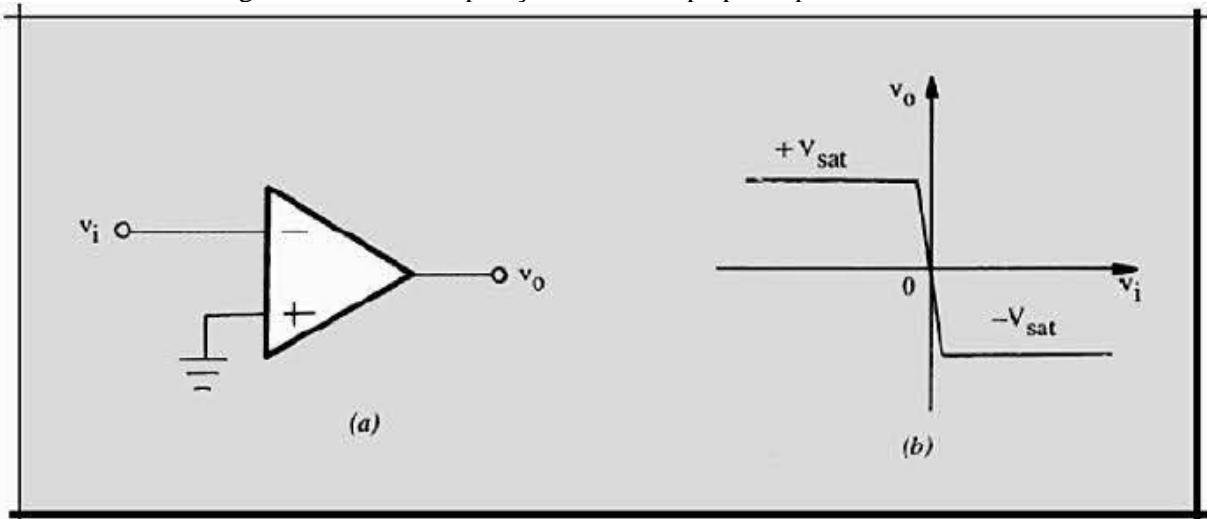
Figura 5 - Modo de operação de um AmpOp comparador não inversor



Fonte: PERTENCE JUNIOR (2003).

O funcionamento de um comparador inversor se dá de forma análoga, como ilustrado na Figura 6. Quando a diferença de tensão entre as entradas do amplificador operacional é negativa, a saída é positiva, e quando a diferença de tensão é positiva, a saída é negativa.

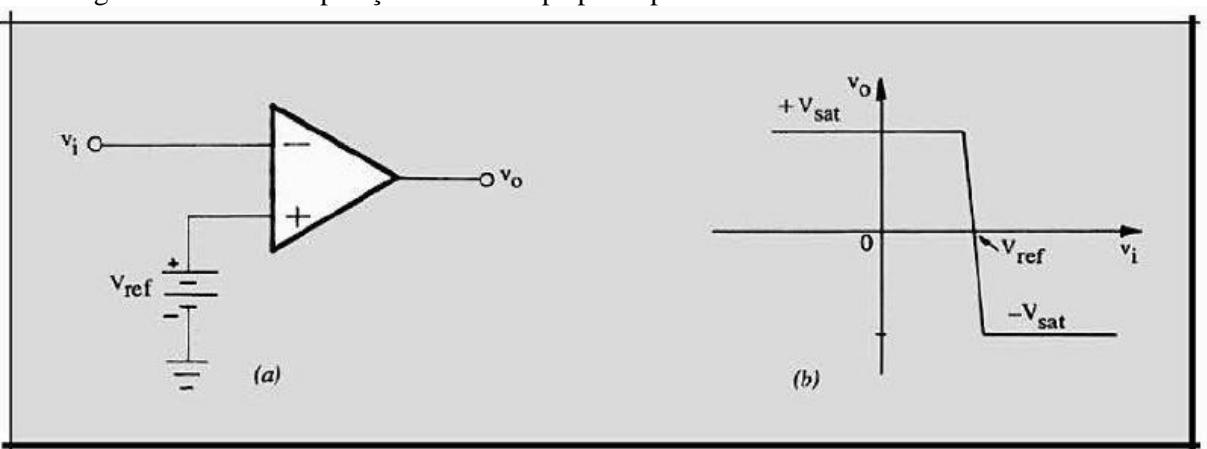
Figura 6 - Modo de operação de um AmpOp comparador inversor



Fonte: PERTENCE JUNIOR (2003).

Com uma pequena diferença na tensão entre as duas entradas do amplificador operacional é possível acionar o comparador, levando a uma das duas condições citadas acima. Embora o modo de operação das Figuras 5 e 6 apresentem a tensão de referência ligada no terra, também é utilizado comparações com tensões de referência não-nulas. Na Figura 7 é ilustrado uma ligação do AmpOp comparador inversor com Vref não-nula, e o consequente modo de operação.

Figura 7 - Modo de operação de um AmpOp comparador inversor com referência não nula



Fonte: PERTENCE JUNIOR (2003).

Circuitos de zero-cross são feitos utilizando um amplificador operacional como comparador. O maior problema que ocorre é que em uma rede elétrica de 60hz cada ciclo dura aproximadamente 16.6 milissegundos, isto é, cada meio ciclo dura 8.3 milissegundos. Normalmente a largura de pulso de um detector de zero é aproximadamente 0.5 milissegundos, o que equivale a 6% do meio ciclo do pulso. Com isso em mente, é possível entender a causa dos dimmers apresentarem uma variação de 10 a 90% do valor total da tensão.

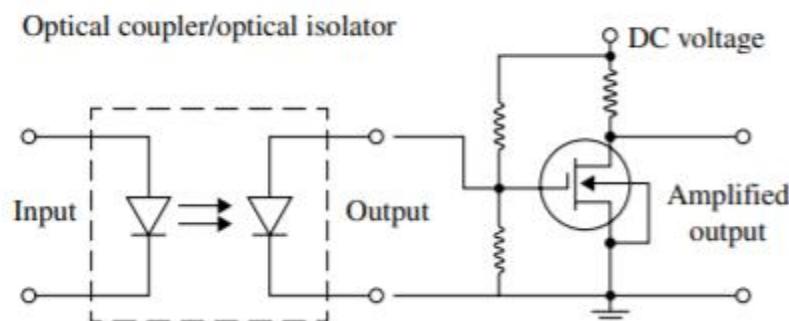
2.1.4. Acoplador óptico

“An optical coupler is used in electronics to prevent a voltage spike or a short to ground in one device from disrupting the operations of a more central electronics package.” (JOSEPH; BERNAL, 2016, p.228)

O acoplador óptico (opto-acoplador) funciona como uma chave, utilizando um conjunto emissor/receptor de luz, montados em um único encapsulamento. Ele funciona como um isolamento entre dois circuitos em que as tensões podem tanto iguais quanto diferentes.

O isolamento dos circuitos funciona internamente dentro do opto-acoplador onde um fototransistor identifica a luz de um diodo emissor, como se houvesse uma resistência infinita dentro do acoplador óptico, pois não há passagem de corrente. A luz funciona como a corrente mínima no gate do tiristor, que permite a passagem da tensão. Um circuito simplificado é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Circuito simplificado de um opto-acoplador com saída para um amplificador



Fonte: JOSEPH; BERNAL (2016).

Como os circuitos ficam isolados, é possível utilizar um acoplador óptico em um circuito de zero-cross, onde há o isolamento da fonte com o circuito interno do microcontrolador, sem o risco de danos aos componentes.

2.2. Controle de potência

O controle da potência aplicada a determinada carga pode ser implementado de diversas maneiras. Uma primeira estratégia consiste em usar um potenciômetro.

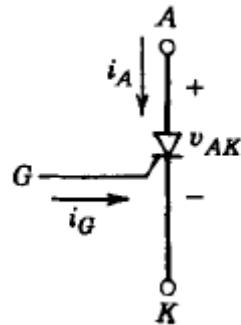
“Potentiometers convert rotary motion or linear displacement into a change of resistance, supplying a smooth transition of voltage or current levels. The resulting voltage output may be used to control position transducers in a wide variety of potential transportation, industrial and medical applications.”
 (HONEYWELL, 2014, p.1)

Os potenciômetros analógicos conseguem uma maior amplitude de variação da resistência, mas em uma estratégia de controle digital este dispositivo não é o adequado. Existem aplicações onde são utilizados potenciômetros digitais, mas os mesmos apresentam uma variação pequena da resistência, limitando sua aplicação a casos específicos.

Outra forma de controle da potência é por meio de chaveamento, usando dois estados de funcionamento. Um deles é o de condução, quando a tensão é nula, que faz com que a corrente possa fluir normalmente no circuito passando pela chave, energizando assim a carga. O outro estado é o de bloqueio, quando a corrente é nula, que faz com que a corrente seja bloqueada na parte do circuito em que se dá o acesso pela chave.

Um dos componentes utilizados para controle por meio de chaveamento é o tiristor ou TRIAC. Este componente possui um ânodo e um cátodo, que é por onde a corrente flui, e um terminal denominado *gate*, que é responsável por determinar o estado do tiristor, condução ou bloqueio da tensão. A Figura 9 ilustra o dispositivo, onde a corrente I_a flui do terminal positivo para o terminal negativo, desde que a corrente no *gate* seja a necessária para o funcionamento.

Figura 9 - Circuito de um tiristor



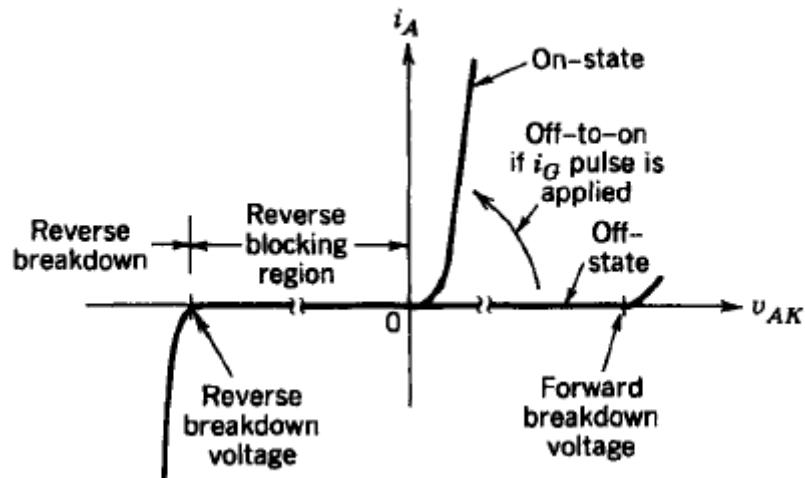
Fonte: MOHAN; UNDELAND; ROBBINS (2003).

“The thyristor can be triggered into the on state by applying a pulse of positive gate current for a short duration provided that the device is in its forward-blocking state.” (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003, p.18).

Para o funcionamento o *gate* precisa de um pulso de corrente positiva mínima (I_g), que varia de acordo com o TRIAC, para liberar fechar o circuito e liberar a corrente entre o ânodo e o cátodo. O tiristor continua em condução desde que a corrente I_g seja maior do que a mínima necessária para manter este estado.

A condução continua até o ponto de zero do semi-ciclo da onda de tensão que alimenta o tiristor. Esta funcionalidade é ilustrada na Figura 10, por meio de um gráfico de corrente do ânodo pela tensão dos terminais ânodo-cátodo. A perda de tensão é baixa, normalmente entre 1 e 3V, dependendo do dispositivo.

Figura 10 - Gráfico de corrente do ânodo x tensão ânodo-cátodo de um tiristor



Fonte: MOHAN; UNDELAND; ROBBINS (2003).

Utilizando um microcontrolador é possível mudar o estado de um TRIAC para determinar a porcentagem da potência total que será utilizada em um circuito. Esta prática é chamada de controle de ângulo de fase.

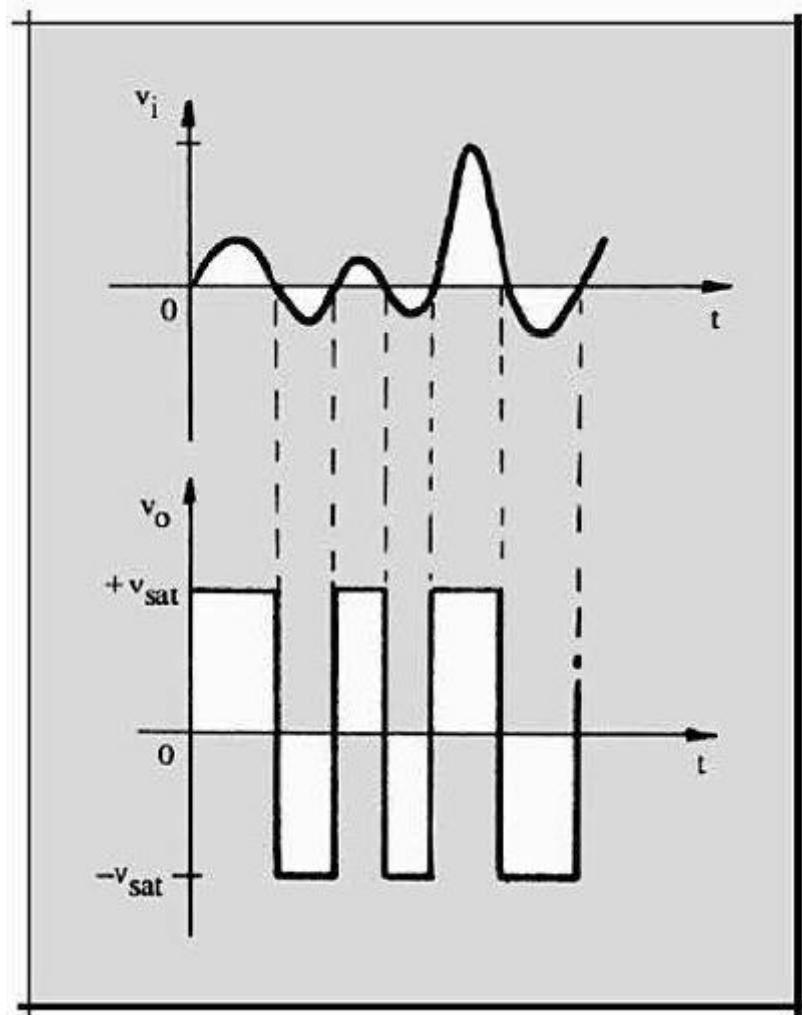
2.2.1. Detector de passagem por zero

Para saber exatamente quando aumentar ou diminuir a tensão no *gate* do TRIAC é necessário estabelecer o sincronismo entre a tensão de alimentação e o circuito de controle. Para tal, é imprescindível identificar a passagem pelo zero da fonte de alimentação, com a finalidade de permitir ou bloquear a corrente no momento certo de acordo com o tempo, para obter a potência desejada.

O zero-cross é feito com um amplificador operacional e detecta literalmente a inversão do pulso do negativo para o positivo e vice-versa em uma onda senoidal. O circuito amplifica o sinal, para que possa ser detectado pelo microcontrolador, e neste caso possui tensão de referência maior que zero.

O funcionamento prático pode ser observado na Figura 11, onde temos uma senóide de tensão da rede e os sinais do amplificador operacional em um circuito comparador não inversor trabalhando no primeiro e no terceiro quadrantes. Ao passar pelo zero da senóide, o amplificador aumenta o sinal para que a saída seja próximo do valor de referência. É possível observar também que na Figura 11 o amplificador operacional funciona no primeiro e no terceiro quadrantes.

Figura 11 - Funcionamento de um AmpOp comparador não inversor como zero-cross



Fonte: PERTENCE JUNIOR (2003).

Com a sincronia entre o circuito de controle e o circuito de carga, é possível controlar um TRIAC com o microcontrolador, acionando nos momentos certos o *gate*, onde é comumente denominado controle por ângulo de fase.

2.2.2. Acionamento de cargas por ângulo de fase

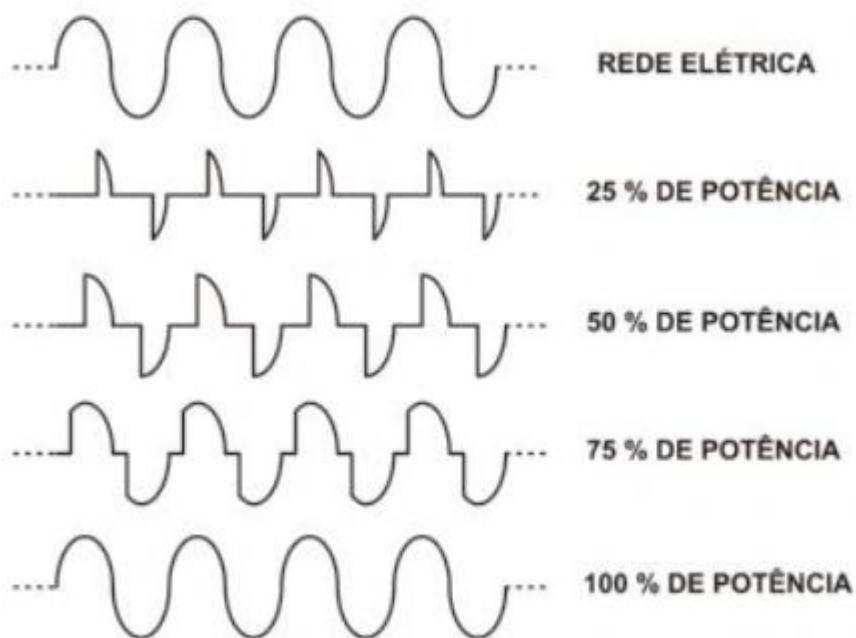
O controle de potência com base no ângulo de fase é uma prática que limita a quantidade de energia aplicada diretamente na carga, baseado no tempo em que um controlador demora para enviar a corrente de ativação no *gate* do tiristor.

"Thyristors are often used in line-frequency converters where the devices are naturally turned off by the line-frequency voltages. In order to control the dc output voltage of the converter and the magnitude and direction of the power flow through the converter, the thyristors must be turned on at a proper delay angle relative to the zero crossing of the ac line voltages. In the case of load voltage commutated thyristor converters, such as those used in very large power synchronous motor drives and induction heating inverters, the gate trigger times of the thyristors are synchronized with the ac voltages of the load." (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003, p.713).

Este processo funciona a partir do pulso de passagem por zero, onde é calculado um tempo baseado na proporção da potência desejada, para cortar a onda por meio de um TRIAC.

Quanto maior o tempo para envio da corrente I_g ao gate do TRIAC, menor a potência obtida na carga. Na figura 12 é ilustrada a relação entre o tempo de ativação e sua proporcionalidade da potência total em relação à potência obtida na carga.

Figura 12 - Modulação de potência pelo tiristor



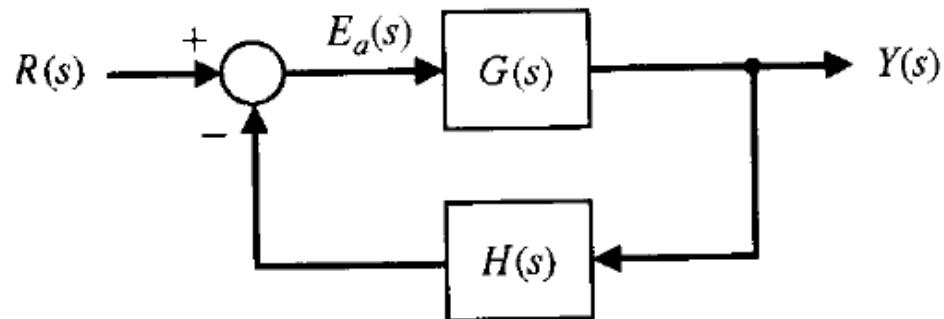
Fonte: NOVUS (2011).

2.2.3. Programação de controle

Para o funcionamento do sistema de controle de potência, é necessário que exista uma programação com a finalidade de ler as diferentes temperaturas identificadas pelo sensor, e com esta informação regule a quantidade de potência que será enviada para o chuveiro.

O controle de malha fechada consiste em obter o resultado da saída do circuito e comparar com a entrada, obtendo assim um erro. Este valor é novamente utilizado no cálculo da entrada, para que o valor de entrada se aproxime mais do valor da saída, minimizando o erro. Na figura 13 é ilustrado o diagrama de blocos desta estratégia de controle.

Figura 13 - Loop básico de feedback de controle



Fonte: DORF; BISHOP (2001).

No presente trabalho foi proposto a utilização da lógica de controle proporcional-integral-derivativo (PID). Este tipo de controle permite a comparação do objetivo desejado em relação ao obtido, a partir de um mecanismo de realimentação, a fim de diminuir os erros. A partir de ações proporcionais, integrais e derivativas, a oscilação e erros que o sistema apresenta são atenuados.

As ações proporcionais, integrais e derivativas são implementadas por constantes que, calculadas a partir da diferença entre a entrada e a saída do sistema, funcionam de maneira diferentes para controlar a resposta do sistema a fim de obter uma saída próxima do desejado.

O controlador de resposta proporcional, K_p , depende do valor instantâneo do erro, podendo assim controlar qualquer sistema estável. A resposta do controle proporcional isolado é bem limitada em estado estacionário, e se o valor de K_p for muito alto ele pode levar o sistema à instabilidade. Com a multiplicação do erro pelo ganho proporcional, o sistema apresenta uma reação imediata, e se configurado corretamente tende a uma variação aceitável próxima do valor desejado.

O controlador de resposta integral, K_i , depende da integral da soma do erro, tornando o controle mais lento quando comparado ao controle proporcional. A limitação da resposta integral de forma isolada é que no limite mínimo ou máximo do valor da variável de controle existe a saturação do sinal. Se a variável estiver integrando positivamente o valor, e este for muito grande, ela chega a um estado denominado “*Winds-up*”, onde é necessário que o controlador saia da saturação e o termo integral se descarregue. Quando isto acontece, a resposta transitória do sistema fica lenta e oscilatória, o que deve ser evitada em processos de controle.

O controlador de resposta derivativo, K_d , controla a mudança do controle no erro, fazendo com que o sistema aja mais rapidamente. O controle derivativo isoladamente tem tendência a agir de forma a antecipar os erros, mas se o sistema possuir algum ruído proveniente de algum componente, a derivada pode calcular o ruído e dar valores absurdos para o controle, tornando assim o sistema instável.

2.3. Estado da Arte

A revisão do estado da arte busca exemplificar trabalhos que também utilizaram métodos de controle de potência para solução de problemas em sistemas utilizados na atualidade, bem como mostrar que é sempre possível aprimorar dispositivos diversos para uma melhoria significativa em seu funcionamento.

Sanjaya, Fauzi, Edikresnha, Munir e Khairurrijal (SANJAYA *et al*, 2017) propuseram em seu trabalho um sistema para controle de potência da velocidade de um motor para produção de fibras de polímero, onde a mudança de velocidade dessa máquina proporciona uma diferença no diâmetro das fibras.

Ali, Arshad, Akhtar, Siddiqi e Kamran (ALI *et al*, 2020) propuseram em seu trabalho a identificação de passagem por zero como técnica mais eficiente para ligar e desligar cargas fictícias em usinas hidrelétricas para diminuir o ruído, harmônicos e transientes, gerados pelo método atual utilizado.

Alam, Chopra (ALAM, CHOPRA, 2020) propuseram em seu trabalho um controlador de carga PID para um gerador síncrono trifásico. A necessidade de este controlador de carga é em micro e pequenas plantas hidrelétricas onde existe uma variação grande da frequência de geração de energia pois não há um fluxo de água constante.

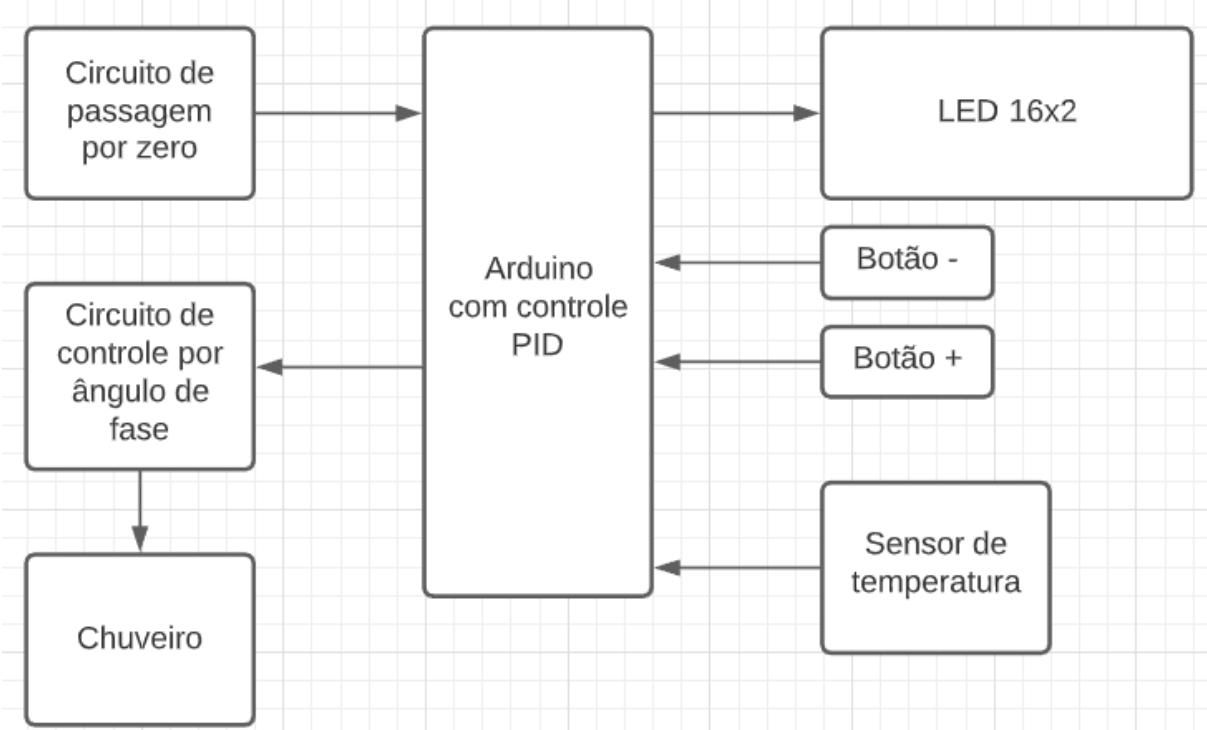
Yazdkhasti, Diduch (Yazdkhasti, Diduch, 2019) propuseram em seu trabalho um controle para o gerenciamento de carga em aparelhos de controle de temperatura. O modelo é baseado em uma carga agregada combinado a um controle PID simples, para informar ao operador do sistema sobre a carga futura.

3. PROJETO DESENVOLVIDO

3.1. Esquemático do Projeto

O projeto é um dispositivo de regulagem automática da temperatura da água de um chuveiro elétrico, a partir de um sistema PID aplicado por um arduino a fim de controlar a potência por controle de ângulo de fase. Como a sincronia dos circuitos é necessária, é utilizado um circuito de identificação de passagem por zero, além de um sensor para medir a temperatura da água e botões para que o usuário possa interagir com o dispositivo. A Figura 14 ilustra um diagrama de blocos com as partes fundamentais do projeto.

Figura 14 - Diagrama de blocos demonstrando a ideia base do dispositivo

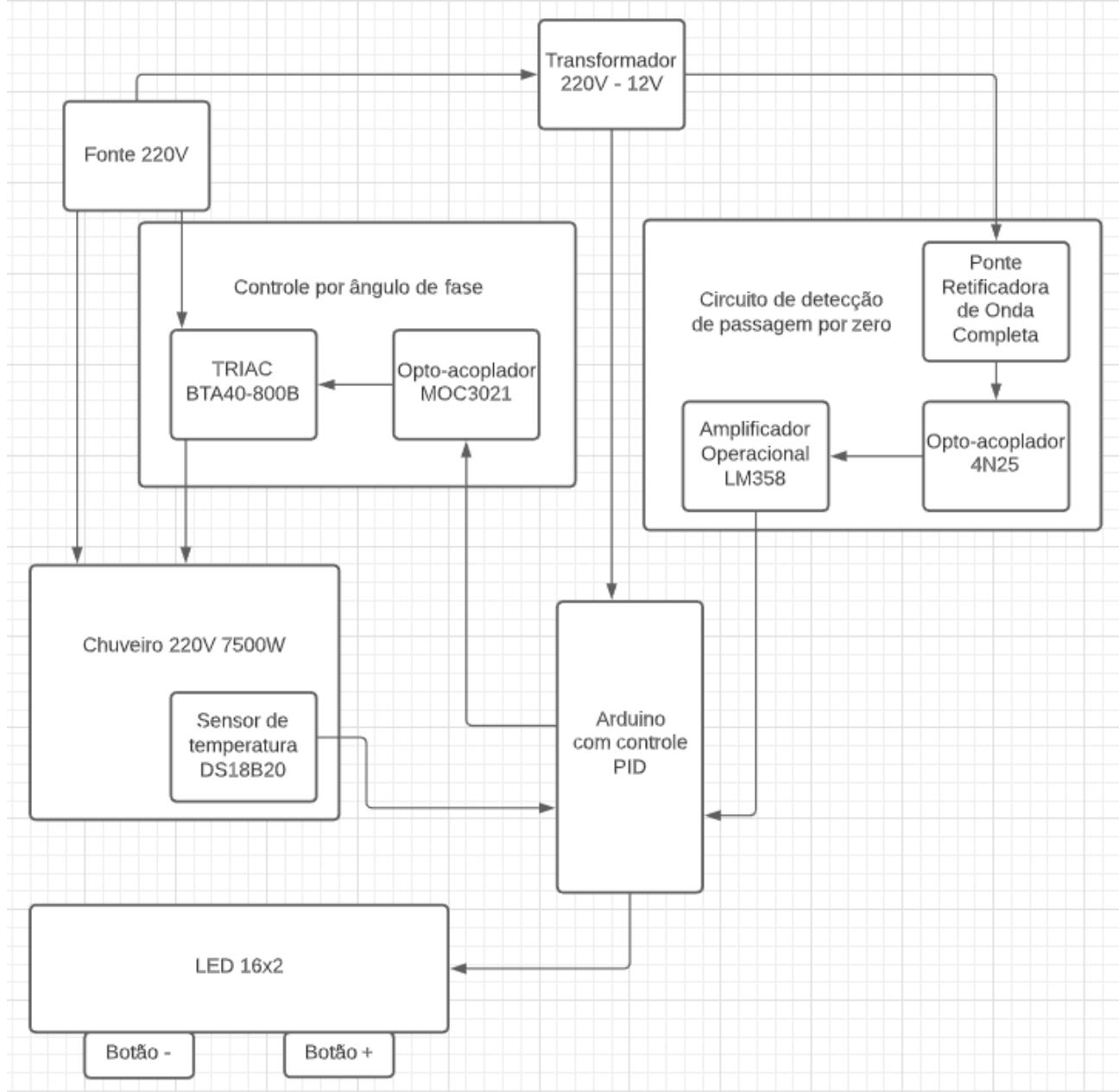


Fonte: Autoria Própria (2020).

A partir da ideia inicial, algumas definições podem ser feitas. O chuveiro utilizado neste projeto foi de 220V 7500W, e todos os componentes foram projetados para o funcionamento especificamente com uma fonte de 220Volts.

A Figura 15 ilustra a composição de cada componente do diagrama da Figura 14, mostrando assim um diagrama com as minúcias de cada parte do dispositivo projetado.

Figura 15 - Detalhamento de cada bloco do diagrama de componentes do dispositivo



Fonte: Autoria Própria (2020).

A partir da fonte de 220V que alimenta tanto o chuveiro quanto o transformador 220V-12V, temos a energia necessária para o sistema funcionar. O gasto energético dos componentes desse dispositivo não são significativos quando comparado à potência do chuveiro.

O transformador é ligado no Arduino e na ponte retificadora de onda completa, a qual transforma o semi-ciclo negativo em positivo, obtendo assim a saída que será lida pelo opto-acoplador 4N25.

Sempre que a tensão no opto-acoplador é próximo de zero, o amplificador operacional LM358 recebe em sua entrada não inversora um pulso de tensão maior do que a tensão de referência na entrada inversora, fazendo assim a saída do amplificador operacional passar de baixa tensão para alta tensão.

O sensor de temperatura DS18B20 que se encontra dentro do misturador do chuveiro identifica a temperatura atual e envia para uma entrada digital do Arduino a leitura do sensor.

Os botões são para seleção da temperatura desejada pelo usuário, e tanto este valor quanto o da temperatura atual são mostrados no LED 16x2.

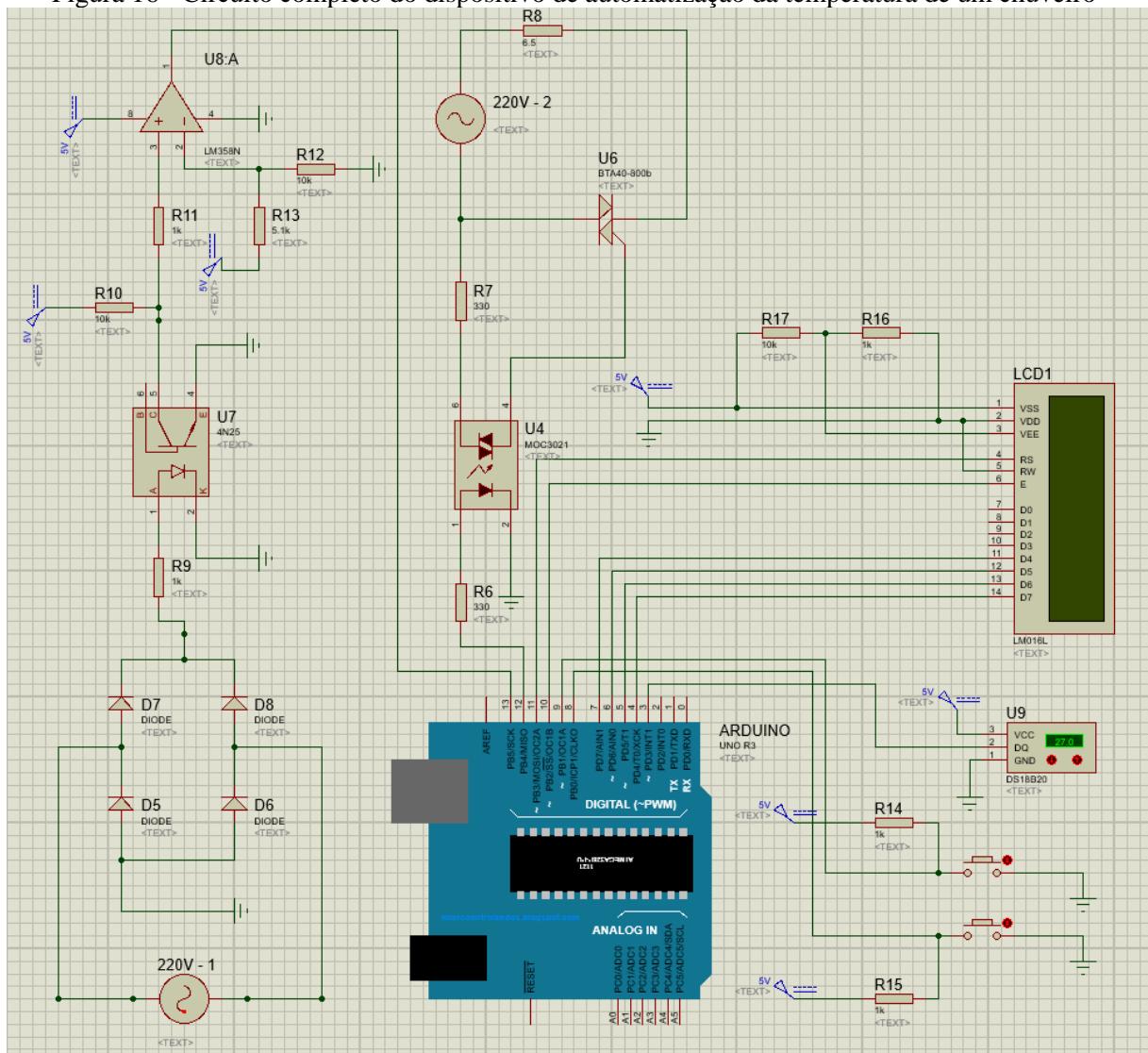
O Arduino então, em posse da temperatura atual, temperatura desejada, e pulsos de *zero-cross*, computa a partir do código de programação se a temperatura tem que aumentar ou diminuir, e se caso tiver que aumentar, aciona a parte do código do PID que fará o controle do aumento de temperatura até que esta se estabilize próxima do valor escolhido pelo usuário.

Para o controle da potência do chuveiro, o Arduino envia através de uma porta digital um sinal à entrada do opto-acoplador MOC3021, que serve de isolamento entre o circuito de controle e o circuito de potência, além de enviar o sinal do arduino para o TRIAC BTA40-800B. Quando este sinal chega ao TRIAC, ele passa a conduzir a corrente entre seus terminais até que a onda senóide passe pelo zero. Esse tempo que leva entre o Arduino receber o pulso de passagem por zero e o envio do pulso para a porta do tiristor é proporcional à potência desejada no chuveiro. Quanto mais tempo passar entre o recebimento e o envio do pulso, menor será a potência na carga.

3.2. Componentes, Circuitos e Programação

A Figura 16 apresenta o circuito montado na software de testes Proteus, com todas as ligações necessárias dos componentes utilizados no circuito, ilustrados na Figura 15. Cada um desses componentes e sua respectiva programação serão explicados em mais detalhes neste capítulo.

Figura 16 - Circuito completo do dispositivo de automatização da temperatura de um chuveiro



Fonte: Autoria Própria (2020).

3.2.1. Arduino Uno

Existem diversas famílias de microcontroladores, cada uma com vantagens e desvantagens. No presente projeto, adotou-se a plataforma Arduino por diversos fatores: capacidade de processamento necessária, preço, disponibilidade no mercado, grande quantidade de bibliotecas para vários tipos de projetos, programação facilitada, e pela experiência prévia com a plataforma.

O arduino, como a maioria dos microcontroladores, precisa de 12V na entrada de energia para um normal funcionamento, e como os terminais de energia nesse projeto são de 220V, é necessário utilizar um transformador para energizar o arduino e alguns componentes do circuito.

Como o Arduino Uno opera em 5V, todas suas saídas digitais possuem essa capacidade de saída, bem como as saídas analógicas tem capacidade de 0 a 5V. Por operar nessa tensão e possuir saída de 5V e GND, facilita a montagem do circuito de vários componentes utilizados, como o LED, energia e tensão de referência do amplificador operacional, botões pressão, e sensor de temperatura.

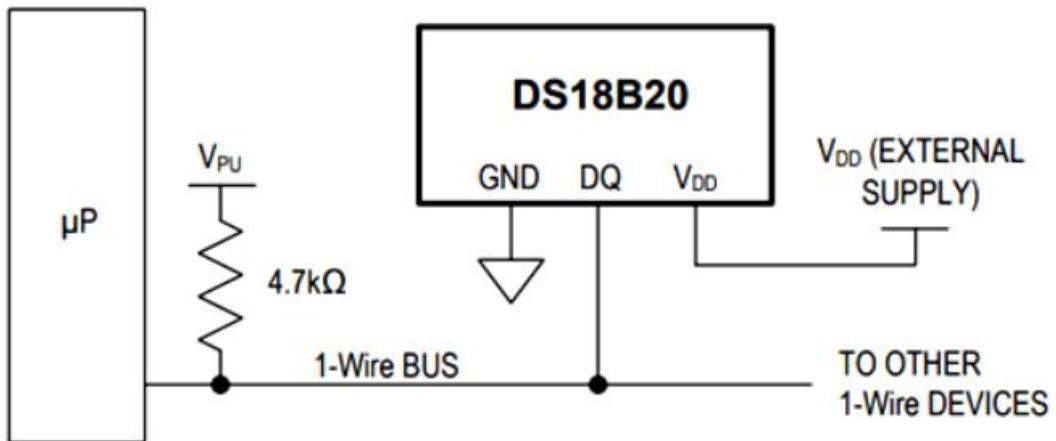
Das 14 portas digitais disponíveis no microcontrolador, foram utilizadas seis portas para o LED, duas portas para os botões de seleção, uma porta para o sensor de temperatura, uma porta para o sensor de zero-cross, e uma porta com para o circuito de controle de tensão, como ilustrado no circuito completo, na Figura 16.

3.2.2. Sensor de Temperatura

O sensor de temperatura DS18B20 foi selecionado por ser impermeável, ter um preço baixo, além de ser facilmente encontrado. Além disso, a temperatura de funcionamento do sensor é de -55°C a 125°C.

O circuito de funcionamento é ilustrado na Figura 17. Este sensor tem três fios, um deles para comunicação e os outros dois para energia. O resistor de *pull-up* é utilizado para manter o barramento em estado alto, quando o sensor não está em uso.

Figura 17 - Funcionamento do sensor de temperatura DS18B20



Fonte: MAXIM INTEGRATED (2019).

A temperatura medida é armazenada em um registrador dentro do sensor. Com alguns comandos é possível obter os dados no registrador. Como o arduino é utilizado, é possível utilizar as bibliotecas já criadas para comunicar com o sensor e obter a temperatura.

O código utilizado somente para a obtenção da temperatura pelo sensor é ilustrado na figura 18. Após adicionar as bibliotecas padrão, neste caso Onewire e DallasTemperature, é necessário definir uma porta no arduino para receber a informação, e neste caso foi selecionada a porta digital 3. Após definir as bibliotecas e a porta para comunicação, o código inicializa os sensores, envia o comando para medição de temperatura e logo após o coloca em uma variável que será posteriormente usada no código PID para comparação com a temperatura desejada.

Figura 18 - código para detecção de temperatura pelo DS18B20

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Fio de dados do sensor plugado na porta digital 03 do Arduino
#define ONE_WIRE_BUS 3

// Define uma instancia do oneWire para comunicacao com o sensor
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);

// Recebe a informacao do oneWire para o calculo da temperatura
DallasTemperature sensors(&oneWire);

void setup(void)
{
    // Inicializa os sensores
    sensors.begin();
}

void loop()
{
    // Envia o comando para receber a temperatura na porta 03
    sensors.requestTemperatures();
    // Coloca na variavel "atual" a temperatura para ser processada posteriormente
    atual = sensors.getTempCByIndex(0);
}
```

Fonte: baseado em DIMITROV (2016).

A biblioteca OneWire inclui sensores de temperatura com comunicação por um fio e é necessária. Já a biblioteca DallasTemperature é incluída para fazer a conversão da mudança de tensão no sensor de temperatura DS18B20 para graus Celsius ou Fahrenheit, a partir da leitura enviada para o arduino.

3.2.3. Detector de Passagem por Zero

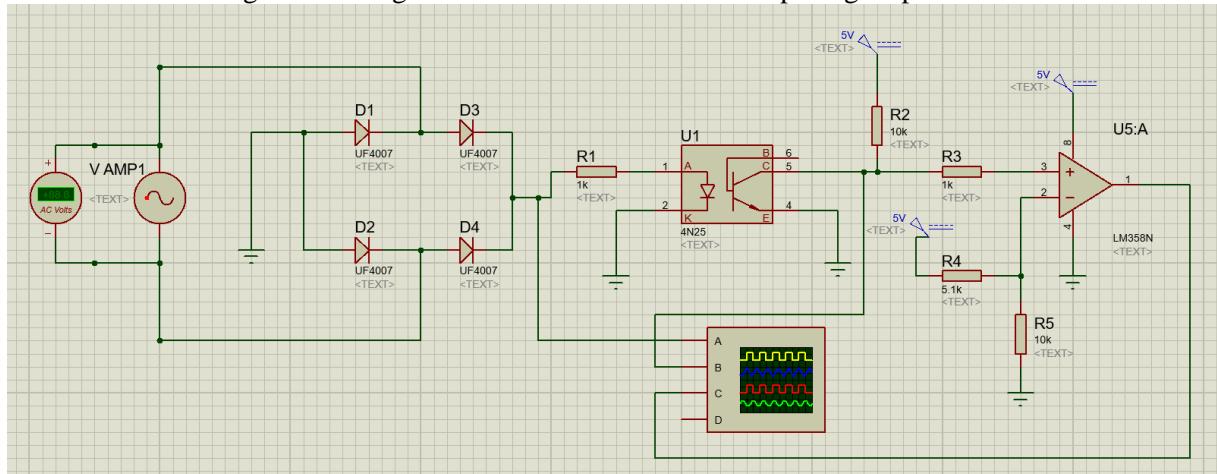
O circuito de detecção de passagem por zero é importante para estabelecer o sincronismo de rede entre o arduino e o chuveiro. Neste circuito foi utilizado um transformador de 220V para 12V, onde as saídas de baixa tensão são conectadas a uma ponte retificadora de onda completa, utilizando 4 diodos UF4007 de 1A. Como a ponte é de

onda completa, é possível detectar o zero no meio do ciclo da tensão. Esta identificação é importante, pois é possível controlar o circuito final até nos semi-ciclos da tensão.

Essa ponte é ligada no optoacoplador 4N25 por um resistor. A seleção deste fotoacoplador mais básico foi justamente por estar conectado à tensão de 12V e não exigir corrente alta para funcionamento. O 4N25 faz juntamente com o amplificador operacional a função de detectar o zero na onda senoidal da tensão da fonte.

Ligado na saída do optoacoplador tem-se um amplificador operacional, LM358N, selecionado pelo mesmo motivo do 4N25, por estar dentro das especificações de funcionamento e ser um dispositivo relativamente barato. Um diagrama da montagem do detector de passagem por zero é ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - diagrama do circuito do detector de passagem por zero



Fonte: Autoria Própria (2020).

A saída do opto-acoplador LM358 é ligada ao Arduino Uno, e este se utiliza do programa ilustrado na Figura 20 para a identificação do pulso de *zero-cross*. Como é utilizada uma porta digital para a entrada do pulso proveniente do AmpOp, e este pulso possui duas saídas, 0V ou 5V, a lógica foi identificar se a porta 13 que recebe a saída do amplificador operacional possui nível lógico alto ou baixo, ou seja, 1 ou 0.

Figura 20 - Lógica de programação da saída do circuito de zero-cross

```
// Configura a porta digital 13 para o zero-cross
const zerocross = 13;

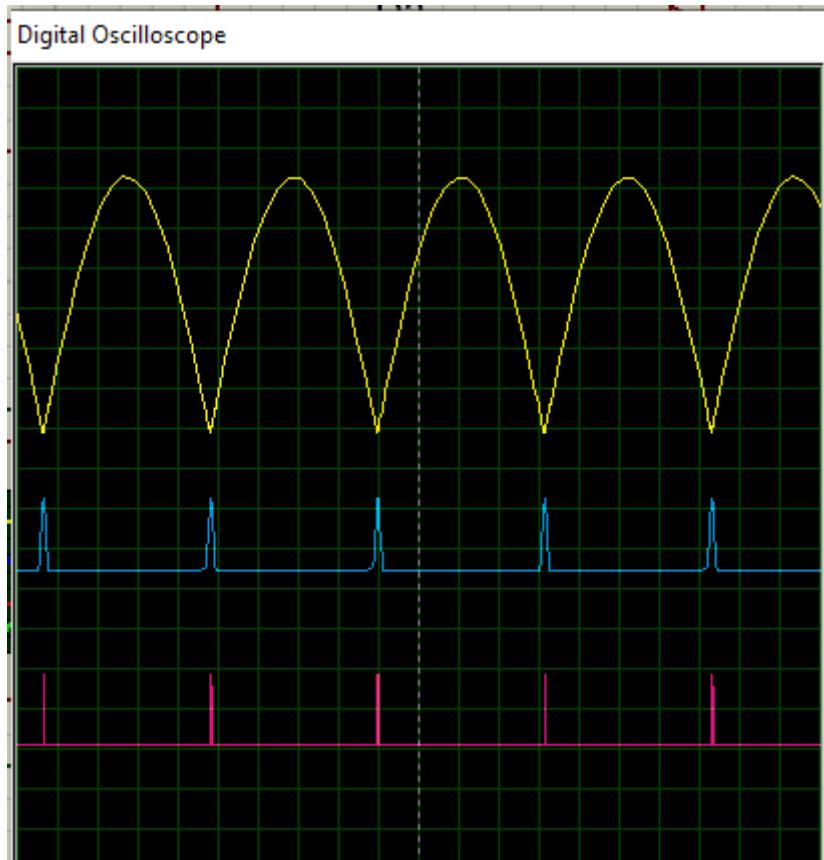
void setup() {
    // Configura a porta digital associada ao zerocross para entrada
    pinMode(zerocross, INPUT);
}

void loop() {
    // Faz a leitura da entrada da porta 13
    // Se obteve 1 na entrada, quer dizer que passou pelo zero
    // Senao nao teve cruzamento de zero
    if(digitalRead(zerocross) == 1){
        cross = 1;
    }
    else{
        cross = 0;
    }
    // put your main code here, to run repeatedly:
}
```

Fonte: Autoria Própria (2020).

O funcionamento conjunto do 4N25 com o LM358 se dá inicialmente com a saída do primeiro conectada na entrada não inversora do segundo, juntamente com uma fonte de 5V. Quando o fototransistor não conduz, o amplificador operacional recebe 5V da fonte, não gerando pulso. Quando o fototransistor conduz, o amplificador satura positivamente, gerando o pulso de cruzamento de zero. Este funcionamento é ilustrado na Figura 21, que mostra as saídas do Osciloscópio Digital. Em amarelo a saída da ponte retificadora, em azul a saída do optoacoplador 4N25, e em rosa a saída do amplificador operacional.

Figura 21 - Circuito de passagem por zero simulado no software Proteus



Fonte: Autoria Própria (2020).

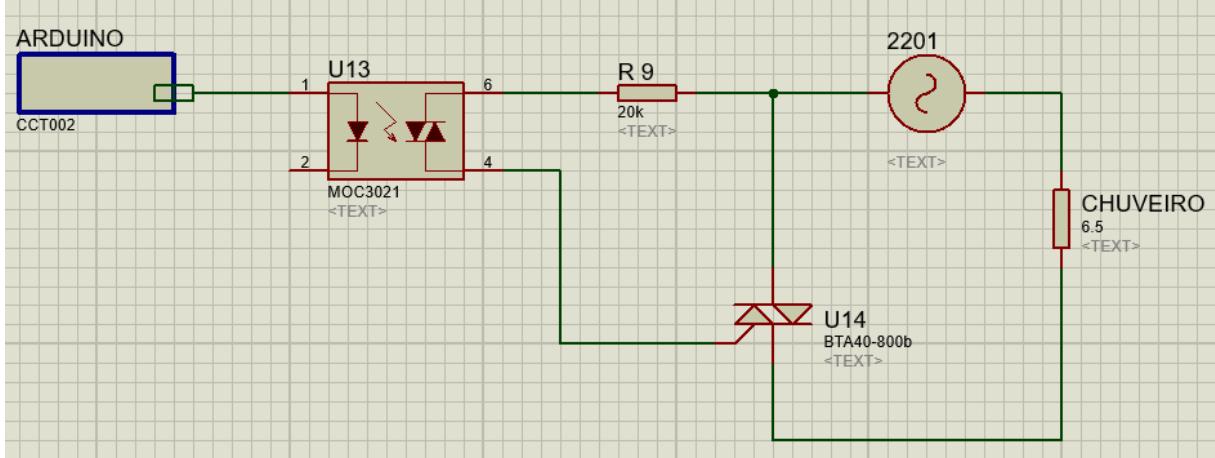
3.2.4. Controle de Ângulo de Fase

Para o controle da potência, foi utilizado um controle de ângulo de fase. Este controle funciona com a variação do valor eficaz da corrente aplicada na carga.

A saída do amplificador operacional é ligada na porta digital 12 do arduino, que recebe o pulso de zero-cross e depois de um tempo determinado pelo controle PID, gera um pulso para o TRIAC no circuito de controle de ângulo de fase.

A porta digital 10 do arduino, conectada ao circuito de controle de ângulo de fase, funciona como controle de tensão do chuveiro. Esta variação é feita com o optoacoplador MOC3021 ligada no chuveiro e no gate do TRIAC BTA40-800B, e o que aciona o optoacoplador é um sistema PID que dependendo da temperatura e do zero-cross. A Figura 22 ilustra o circuito utilizado para este controle.

Figura 22 - Circuito de controle de ângulo de fase



Fonte: Autoria Própria (2020).

A seleção do optoacoplador MOC3021 foi dada por suportar picos de tensão de 400V, o que se faz suficiente pela rede ser de 220V. Este dispositivo é ativado e desativado pelo arduino sempre que este recebe o pulso de zero-cross. Quando a passagem por zero é identificada, depois de um breve período o arduino emite um pulso para liberar a passagem de corrente do optoacoplador para o circuito da carga, que está isolada, fazendo assim o controle de fluxo de potência.

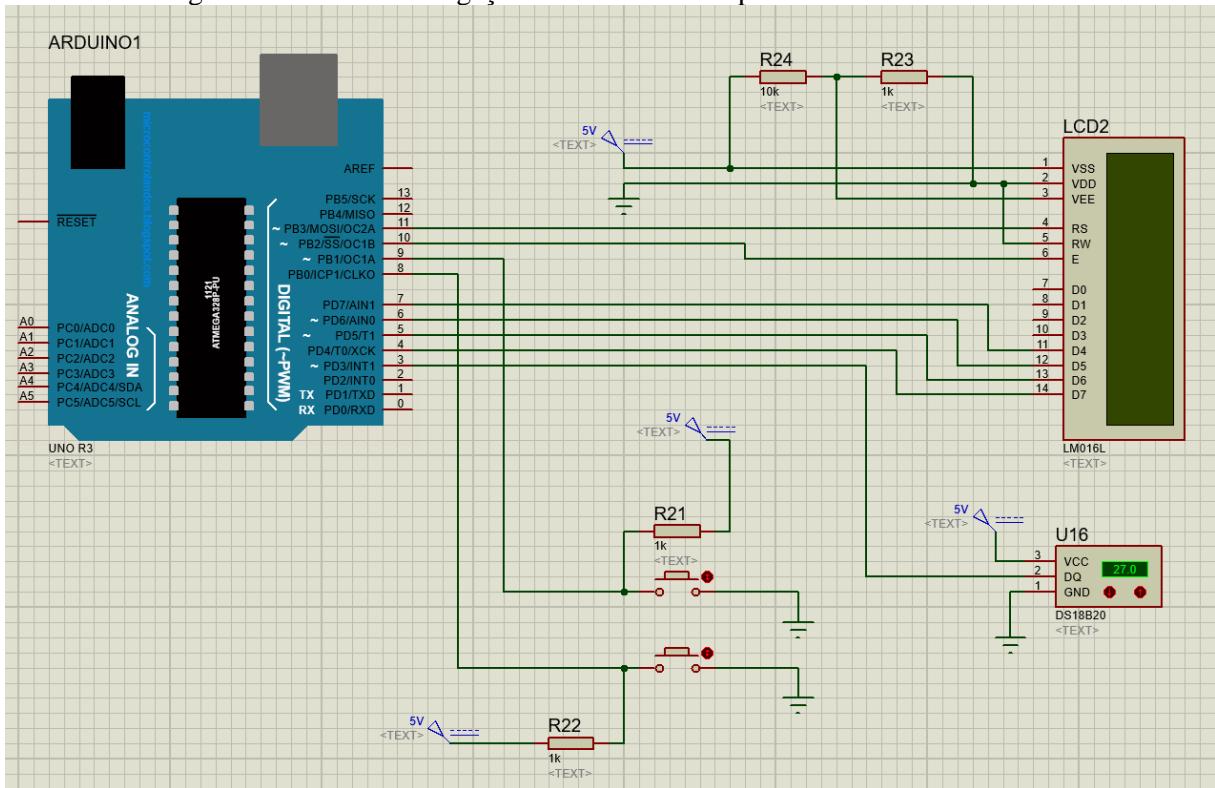
As saídas do acoplador óptico estão ligadas no TRIAC BTA40-800B, que foi selecionado por suportar correntes de até 50A e tensão de 800V. Este TRIAC está superestimado por possíveis ocorrências de pico de corrente fora do máximo de 40A exigido pelo chuveiro. Além disso, com a preocupação de superaquecimento que é relativamente comum em tiristores que aguentam cargas altas, ele possui uma cápsula de isolamento, tornando possível ser resfriado com a própria água do chuveiro desde que esta fique totalmente selada para ter contato com a parte feita para troca de calor.

Com o pulso obtido do MOC3021 no *gate* do TRIAC BTA40, este é liberado para passagem de corrente e consequente funcionamento da carga, neste caso o chuveiro. Novamente, o pulso é dependente do circuito de passagem por zero e do arduino que faz o controle com lógica de PID.

3.2.5. Interface do Usuário

Pela interface de comunicação com o usuário, que consiste no LED 16x2 e nos dois botões de pressão, é possível selecionar a temperatura desejada que será controlada pelo dispositivo e obter a temperatura atual. Essas informações são passadas pelo LED para que o usuário tenha certo controle do dispositivo. O circuito de ligação desses componentes é ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Circuito de ligação do LED e botões para interface com usuário



Fonte: Autoria Própria (2020).

A figura 24 ilustra como é possível implementar os botões para aumento e diminuição da temperatura desejada. Neste caso foi determinado 1 grau para cada vez que o usuário pressionar os botões, mas é possível deixar diversos valores, desde que as constantes sejam declaradas como float, por exemplo, para ser possível computar números fracionários.

Nesta lógica quando algum botão é pressionado, o nível lógico alto é estocado em uma variável, e ao soltar o botão a lógica de aumento ou diminuição faz o cálculo da temperatura desejada. Esta função foi implementada desta forma, pois se o botão fosse implementado de

forma contínua, o cálculo da temperatura sobe ou desce extremamente rápido já que a leitura pelo arduino se dá varias vezes por segundo.

Figura 24 - Código dos botões para aumento e diminuição da temperatura

```
const int botaoM = 8; //botao pra variavel negativa no pino 8
const int botaoP = 9; //botao pra variavel positiva no pino 9
int varM=0, varP=0; //variaveis de comparação
int ebM, ebP, temp = 30; //variaveis para ler o estado do botao e temperatura setada

void setup(){
    Serial.begin(9600); //habilita portal serial para analise do codigo

void loop(){
    ebM = digitalRead(botaoM); //le o estado do botao negativo, apertado ou solto
    ebP = digitalRead(botaoP); //le o estado do botao positivo, apertado ou solto
    //funcionamento de comparacao e subtracao da temperatura caso botao = apertado
    if (ebM == 1 && varM == 0){
        varM = 1;
    }
    if (ebM == 0 && varM == 1){
        temp = temp-1;
        varM = 0;
    }
    //funcionamento de comparacao e adicao da temperatura caso botao = apertado
    if (ebP == 1 && varP == 0){
        varP = 1;
    }
    if (ebP == 0 && varP == 1){
        temp = temp+1;
        varP = 0;
    }
    Serial.println(temp);
}
```

Fonte: Autoria Própria (2020).

3.2.6. Lógica de Controle Proporcional-Integral-Derivativo

O pulso gerado pelo arduino depende do controle PID para estabilizar a temperatura no misturador do chuveiro de acordo com o selecionado na interface do usuário. O controle leva em consideração a temperatura atual da água e a temperatura desejada pelo usuário.

A temperatura é obtida no misturador do chuveiro. Essa temperatura é enviada ao arduino e também mostrada no visor LED. O visor também mostra a temperatura desejada pelo usuário e esta é interativa com os botões que aumentam ou diminuem a mesma.

Ao receber todas essas informações, a lógica de PID faz os cálculos necessários, baseado nas constantes de proporcionalidade, para estabilizar a temperatura em um nível próximo ao selecionado.

Na Figura 25 é ilustrado o código utilizado para testes colocando um LED ao invés de utilizar o chuveiro, para um controle PWM com a porta digital 10 do Arduino.

Inicialmente o programa recebe as bibliotecas PID_v1, OneWire e DallasTemperature, logo em seguida é definido o valor e nome das variáveis e constantes que serão utilizados nos cálculos. As constantes PID neste sistema foram definidas por testes consecutivos com o circuito de teste, então este não reflete as constantes para um circuito com o chuveiro. É programado então a inicialização da leitura do sensor de temperatura, a temperatura desejada e o modo de atuação do PID. Com a temperatura obtida, o sistema calcula a potência necessária na porta digital 10 e envia para o sistema para o controle do LED.

Este sistema PID utilizado para testes com as constantes, foi necessário para testar o código em geral e futura implementação do acionamento por pulso para o acionamento da carga.

Figura 25 - código do PID com sensor de temperatura na porta PWM do arduino

```
#include <PID_v1.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

//Accionamento sensor de temperatura
#define ONE_WIRE_BUS 3
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

//Variáveis
double Setpoint, Input, Output;
//Parametros do PID
double Kp=15, Ki=2, Kd=0.5;

//Inicializacao do PID
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

void setup()
{
    //Inicia a porta serial
    Serial.begin(9600);
    sensors.begin();
    //Setpoint é o valor definido que o PID irá estabilizar
    Setpoint = 34;
    //Inicia o PID
    myPID.SetMode(AUTOMATIC);
    //Ajusta os valores das constantes
    myPID.SetTunings(Kp, Ki, Kd);
}

void loop()
{
    //Inicia o sensor de temperatura e coloca na variavel input
    sensors.requestTemperatures();
    Input = sensors.getTempCByIndex(0);
    //Calculo do PID
    myPID.Compute();
    //Escreve na variavel output o calculo da funcao PID
    analogWrite(10,Output);
    //Envia os dados para a porta serial para plotar o gráfico
    Serial.print(Input);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(Output);
}
```

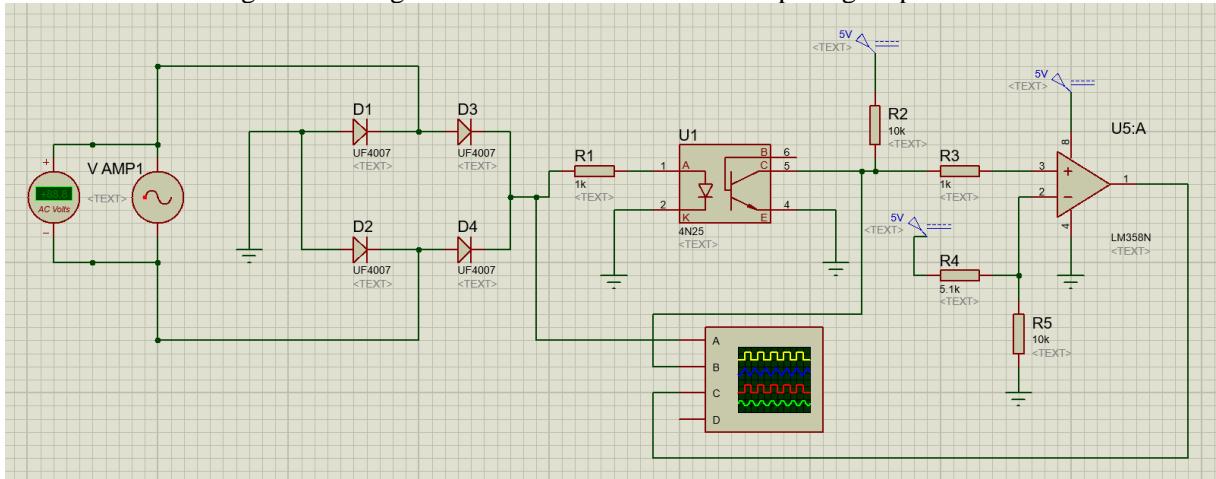
Fonte: FONTENAY (2016)

4. TESTES E RESULTADOS

Este capítulo explicita as contas necessárias para demonstrar os componentes necessários para o circuito e as resistências necessárias para o funcionamento adequado.

Iniciando pelo circuito de *zero-cross*, ilustrado na Figura 26, o transformador de 220V para 12V se faz necessário, pois o circuito será ligado na porta digital do arduino para identificação da passagem de zero a fim de sincronizar o circuito de controle com o chuveiro.

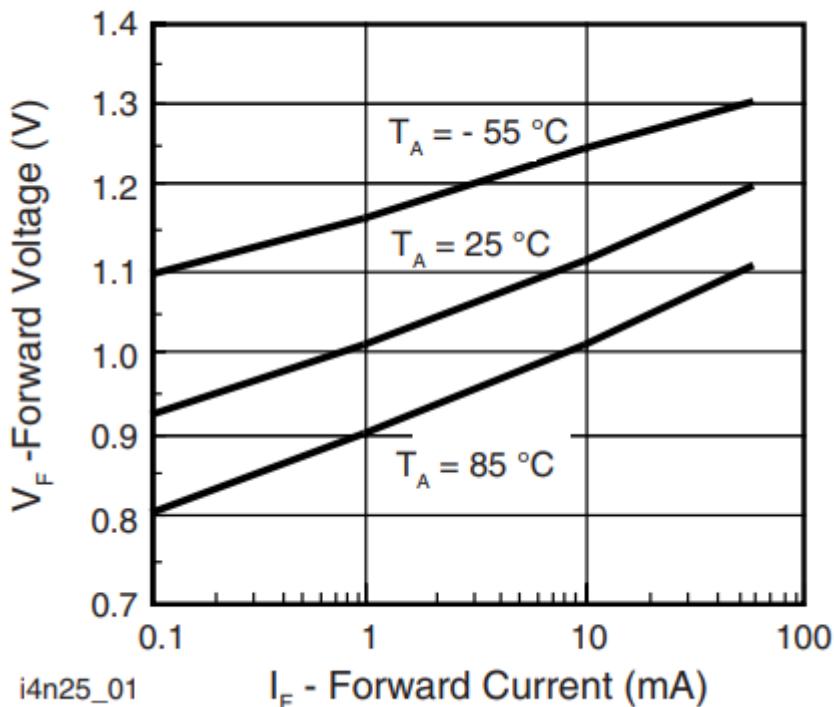
Figura 26 - diagrama do circuito do detector de passagem por zero



Fonte: Autoria Própria (2020).

A primeira resistência, R1, é calculada utilizando a corrente máxima que o optoacoplador 4N25 permite em sua entrada, que neste caso é de 50mA. De acordo com a Figura 27, o fotodiodo funciona com $I_{min} = 0.1\text{mA}$ até $I_{max} = 50\text{mA}$ e tem queda de tensão de 0.9V a 1.3V respectivamente.

Figura 27 - Gráfico de corrente e queda de tensão no fotodiodo do optoacoplador



Fonte: VISHAY (2010)

$$V = R * I \quad (\text{eq1})$$

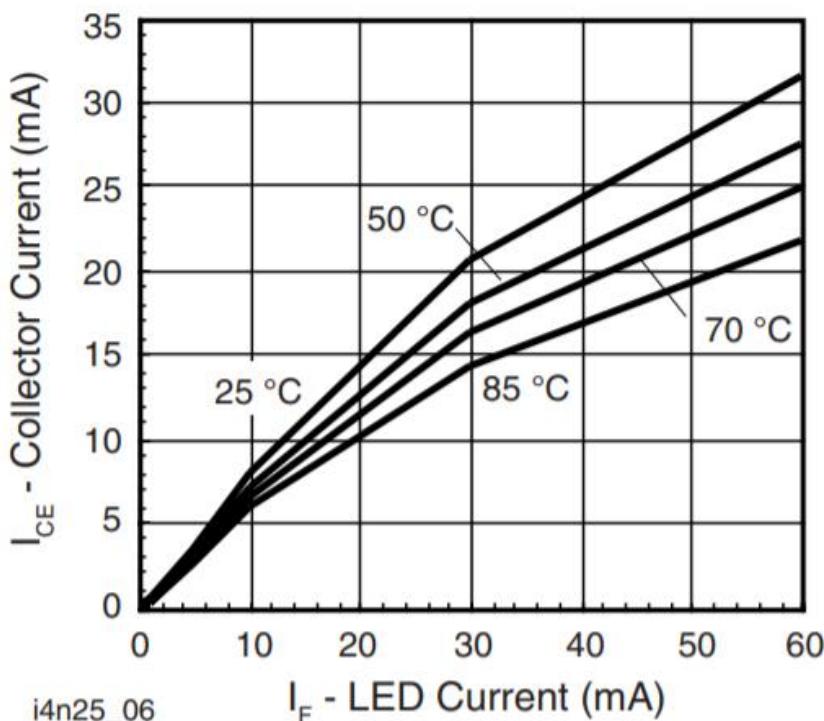
$$R1 = \frac{Vf - Vd - Voa}{I} \quad (\text{eq2})$$

A partir da equação (eq2) é possível encontrar o valor de R1, onde Vf é a tensão da fonte de 12V, Vd é a queda de tensão na ponte retificadora de 1.4V, Voa é a queda de tensão no fotodiodo de 1.3V e i é a corrente que vai passar pelo circuito. Como o fotodiodo tem corrente mínima e máxima de funcionamento e deseja-se ficar dentro do limite, obtém-se a resistência mínima e máxima utilizando Imax e Imin respectivamente. Com a equação (eq2) obtém-se $R1_{\min} = 214 \text{ Ohm}$ e $R1_{\max} = 97k \text{ Ohm}$. Como o valor de R1 pode ser qualquer valor dentre esses dois limites, com testes a partir do software Proteus foi determinado que uma resistência de $R1 = 1k \text{ Ohm}$ seria o mínimo necessário para o funcionamento geral do circuito. Com essa resistência é obtido a corrente máxima de 9.7mA pela equação (eq1).

A partir da corrente máxima da corrente que passa no fotodiodo, pode-se observar na Figura 28 a relação com a corrente de saída do coletor no optoacoplador. Neste caso, a corrente de saída varia de 0 a aproximadamente 8mA, considerando o valor de $I_{\max} = 9.7\text{mA}$

que obtemos para o para a corrente do LED. A aproximação foi possível ser feita por não apresentar diferença suficiente que inviabilizasse o projeto.

Figura 28 - Gráfico da relação da corrente do fotodiodo com a saída do optoacoplador



Fonte: VISHAY (2010)

$$R2 = \frac{Vf - Vt}{Ic} \quad (eq3)$$

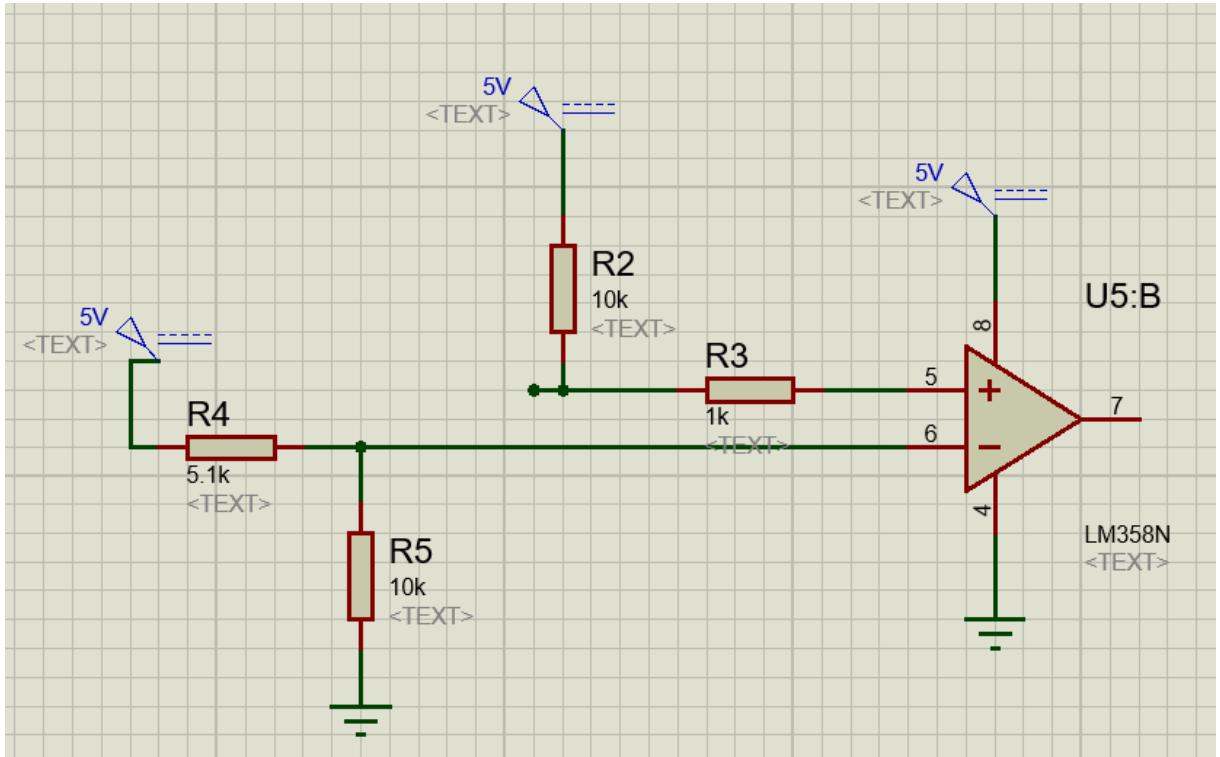
Com esta corrente e sabendo a queda de tensão no transistor na saída do optoacoplador de 0.5V pelo datasheet, é possível calcular o valor de R2. Utilizando a equação (eq3), onde Vf é a fonte de 5V, Vt é a queda de tensão no transistor de 0.5V, e Ic a corrente do coletor do transistor, obtém-se $R2\text{min} = 562\text{Ohm}$ e $R2\text{max} = 56.2\text{kOhm}$. Novamente, por conveniência, será utilizado $R2 = 10\text{kOhm}$.

Quando o optoacoplador conduz, ele impõe que a corrente do circuito passe pelo seu transistor, deixando assim uma tensão aplicada de 0.5V no amplificador operacional, que é o mesmo valor da queda de tensão do transistor. Quando o optoacoplador não conduz, a tensão no amplificador operacional é praticamente 5V. Isto acontece porque o amplificador tem uma impedância praticamente infinita em termos práticos, fazendo com que a corrente que passa no sistema seja tão pequena que a queda de tensão na resistência R2 é ínfima.

A resistência R3 é fixada em 1kOhm pois é necessária para o funcionamento do amplificador operacional. Este valor não tem influência em ligações sem retroalimentação, como no presente caso. Então, o valor foi escolhido por conveniência.

Para o amplificador operacional funcionar como comparador, será feita uma ligação como ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Circuito de um AmpOp comparador não inversor com tensão de referência diferente de zero



Fonte: Autoria Própria (2020).

$$V_{ref} = V_{cc} \left(\frac{R5}{R4 + R5} \right) \quad (eq4)$$

A partir da equação (eq4) pode-se calcular o valor de referência da tensão a ser comparada no amplificador operacional, V_{ref} . Tem-se a tensão $V_{cc} = 5V$, e é necessário estipular um valor para $R4$ e $R5$ a fim de calcular V_{ref} . Neste caso, V_{ref} deve ser maior do que o valor da tensão aplicada no terminal não inversor do amplificador caso o optoacoplador 4N25 esteja em condução, e menor do que esta tensão caso o optoacoplador não conduza.

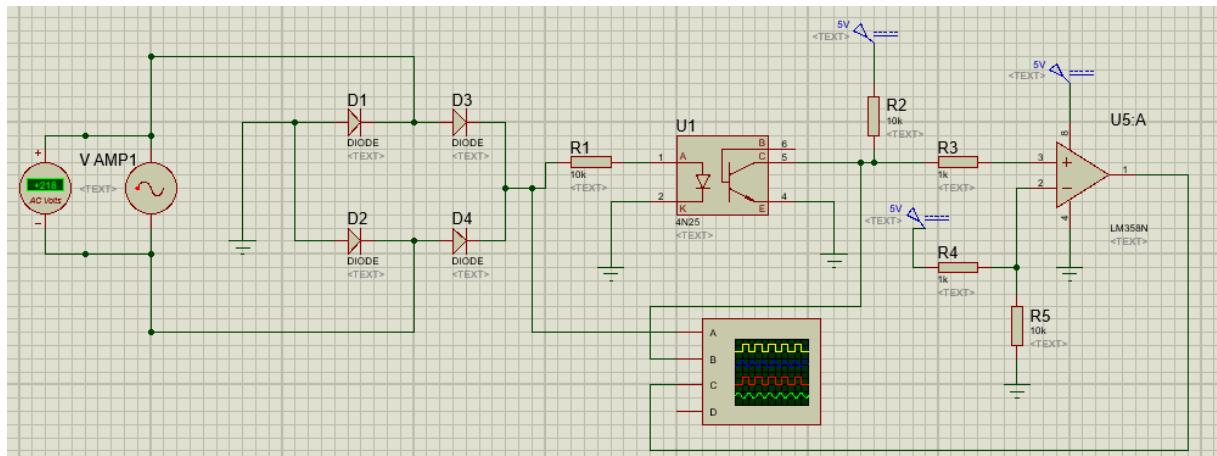
Se a tensão da entrada não inversora for menor do que a tensão da inversora, a tensão de saída do amplificador é praticamente zero. Se a tensão da entrada não inversora for maior do que a tensão da inversora, a tensão da saída do amplificador é próxima do valor da tensão

de ligação do dispositivo, que neste caso é de 5V. Como o amplificador é utilizado para aumentar o sinal recebido antes de comparar, não é necessário muita diferença entre as duas entradas.

Após alguns testes utilizando um osciloscópio digital no software Proteus, foram selecionadas as resistências $R4 = 5.1\text{k}\Omega$ e $R5 = 10\text{k}\Omega$. Utilizando a equação (eq4) obtém-se o valor de $V_{ref} = 3.33\text{V}$. Com este valor, é possível cumprir as condições de funcionamento mencionadas no parágrafo anterior.

O circuito utilizado para o zero-cross pode ser observado na Figura 30. A saída do amplificador operacional que está ligada na entrada C do osciloscópio digital é justamente a saída que será ligada no arduino, para obtenção do pulso de passagem por zero.

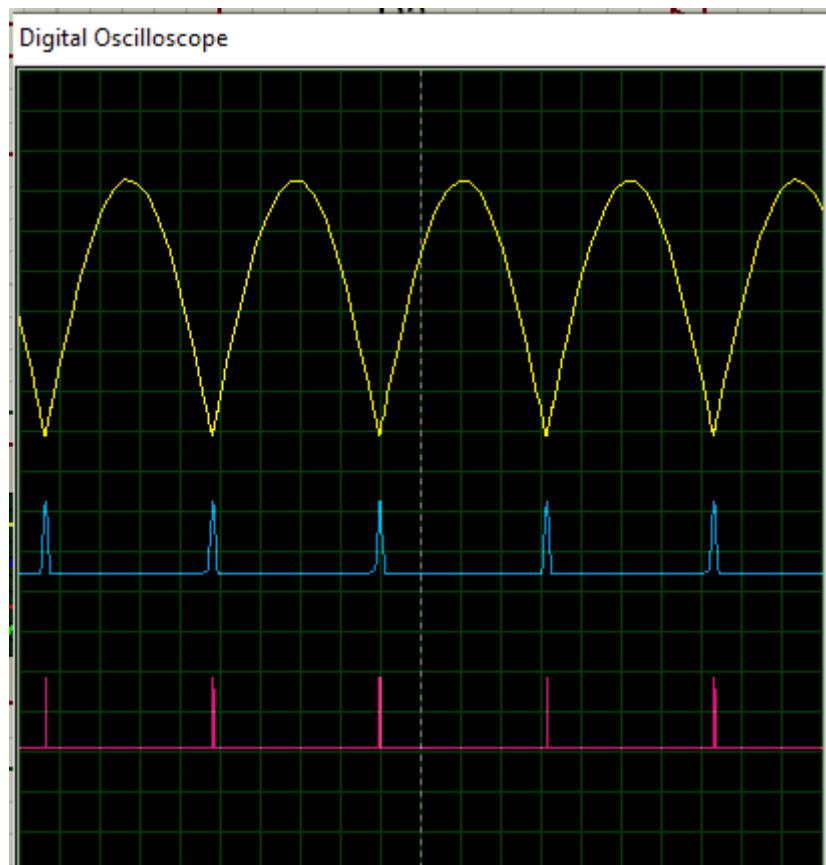
Figura 30 - Circuito de zero-cross simulado no software Proteus



Fonte: Autoria Própria (2020).

Na Figura 31 pode-se observar, em amarelo, a saída da ponte retificadora, em azul a saída do optoacoplador 4N25, e em rosa a saída do amplificador operacional. Pode-se observar claramente o pulso de passagem por zero na saída do amplificador.

Figura 31 - Tensões simuladas no circuito de zero-cross pelo software Proteus

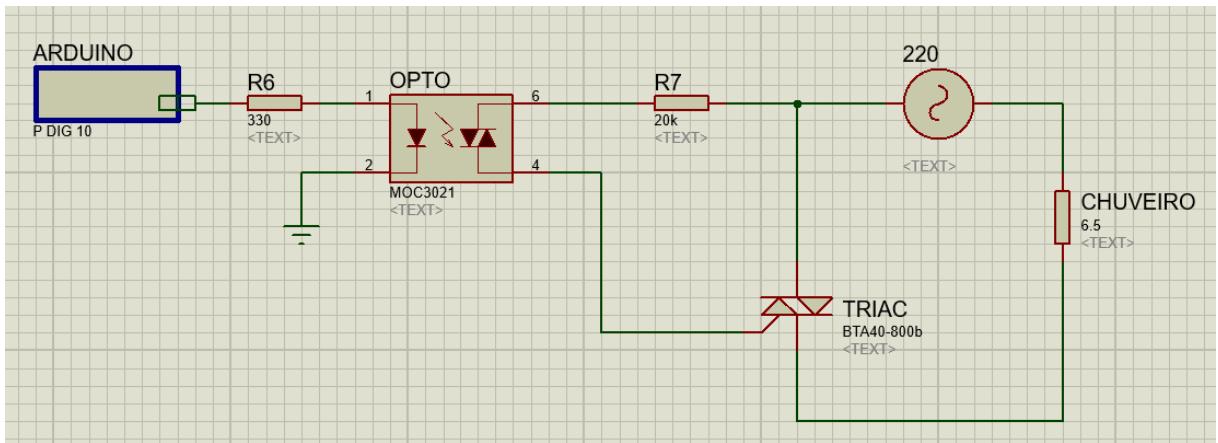


Fonte: Autoria Própria (2020).

Mesmo com a largura de pulso pequena, a taxa máxima de leitura de 10mil vezes por segundo é grande suficiente para garantir que o arduino receba e processe o pulso de zero-cross.

Ao receber o pulso de cruzamento de zero, e a temperatura do sensor DS18B20, o arduino tem a informação necessária para atuar no controle de potência pelo circuito de controle de ângulo de fase. Este circuito é ilustrado na Figura 32.

Figura 32 - Circuito de controle de ângulo de fase simulado no Proteus



Fonte: Autoria Própria (2020).

Com a informação de zero-cross e consequente sincronia com a rede elétrica, o arduino é responsável por emitir um pulso na porta digital 10 para o optoacoplador MOC3021.

$$R6 = \frac{Va - Vop}{I} \quad (eq5)$$

A partir da equação eq5, onde Va é a tensão da porta do arduino de 5V, Vop é a queda de tensão no optoacoplador de 1.15V, pelo datasheet do MOC3021 as correntes de entrada mínima de 8mA e máxima de 15mA, é possível obter o valor de $R6$. Com essas informações obtém-se os valores de $R6\text{min} = 257\text{Ohm}$ e $R6\text{max} = 481\text{Ohm}$. Foi escolhido o valor de $R6 = 330\text{Ohm}$.

$$R7 = \frac{220 - Vops - Vgt - Vc}{Igt} \quad (eq6)$$

A partir da equação eq6 é possível calcular $R7$. As variáveis são: 220V da fonte de tensão, tensão da saída do optoacoplador $Vops$, tensão no gate do TRIAC Vgt , e tensão do chuveiro Vc .

Para $Vops$ pode-se conferir o datasheet do componente, que indica uma perda de carga de $Vops = 1.8\text{V}$. Para Vgt é possível conferir no datasheet do componente, onde $Vgt = 1.3\text{V}$. Para Vc é necessário calcular qual a resistência equivalente do chuveiro.

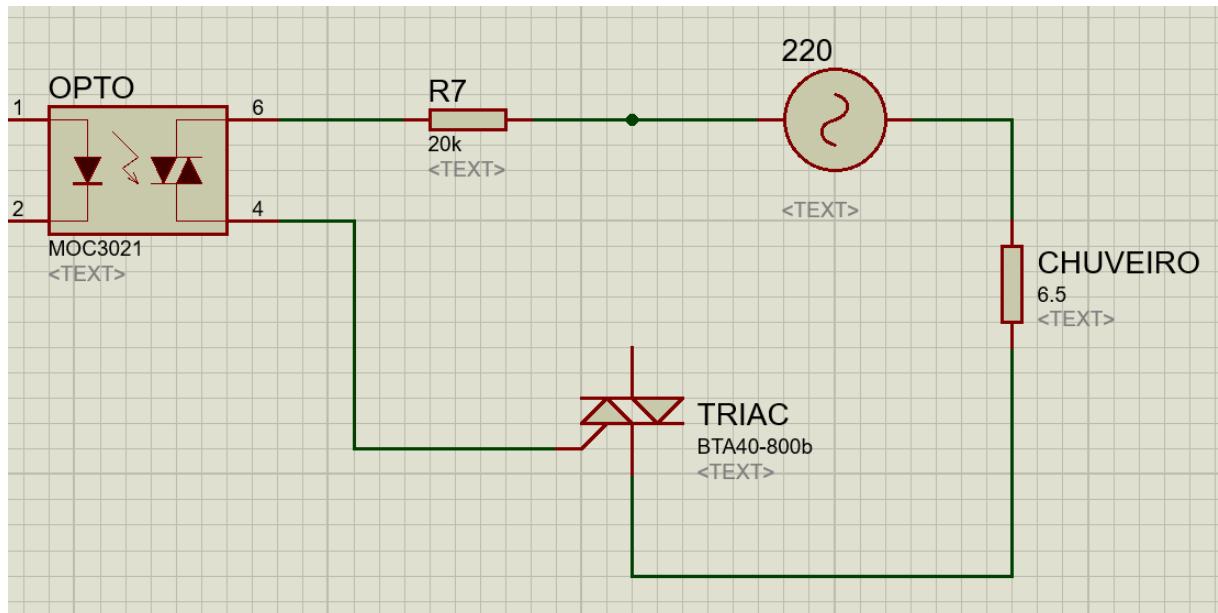
$$P_c = \frac{Vc^2}{Rc} \quad (eq7)$$

Como neste projeto é utilizado um chuveiro de 7500W 220V, pela equação eq7 é possível descobrir o valor de $R_c = 6.5\text{Ohm}$.

A partir dessa informação é possível calcular os valores mínimo e máximo para R7. No datasheet é possível observar que a corrente mínima para ativação do gate, I_{gt} , é de 100mA. Neste caso, têm-se o circuito funcionando de duas formas diferentes, com o optoacoplador em condução e em não condução.

A partir da Figura 33, com o TRIAC em não condução, é possível calcular o valor de R7, com a finalidade de ter a corrente que passa pelo gate do BTA40 dentro das especificações do componente e consequente funcionamento do circuito quando temos o pulso pelo arduino.

Figura 33 - Modo de funcionamento do circuito com o TRIAC em não condução



Fonte: Autoria Própria (2020).

Novamente na equação (eq6), deve-se considerar o mínimo de corrente em I_{gt} de 5% do valor máximo, de acordo com o fabricante. Isso nos dá a $I_{gtmin} = 5\text{mA}$ e $I_{gtmax} = 100\text{mA}$. Com estes valores, têm-se a partir desta equação dois valores para R7, $R7_{max} = 43.37\text{kOhm}$ e $R7_{min} = 2.16\text{kOhm}$. O valor escolhido para esta resistência foi de $R7 = 20\text{k}$.

5. CONCLUSÕES

A partir do objetivo principal deste trabalho, que foi um produto para diminuição dos gastos de água e energia de chuveiros residenciais, pôde-se comprovar o funcionamento teórico a partir dos cálculos realizados no Capítulo 4.

Um dos problemas verificados, mas não calculados, é o tempo de resposta do arduino para enviar o pulso no circuito de controle de potência, pois ao considerar o tempo de detecção e o tempo que leva para o sistema PID ativar o optoacoplador, existe uma perda de tempo no semi-ciclo da onda, com consequente atraso na ativação. Um possível estudo a fim de melhorar o sistema seria cortar um semi-ciclo inteiro quando necessário para diminuir a potencia média por segundo, ao invés de cortar a onda dentro do semi-ciclo.

Todos os testes feitos para este projeto foram utilizando o software Proteus para assegurar o dimensionamento de cada componente do circuito, e o código de programação foi testado em cada componente separadamente, a fim de garantir o correto funcionamento durante um teste com o circuito montado em uma rede de 220V. Por questões de segurança essa decisão foi tomada, já que os testes não puderam ser feitos no laboratório da USP, devido ao isolamento pelo COVID-19. No entanto, o funcionamento em software é consistente uma vez que os componentes utilizados não mudam.

Uma abordagem não considerada neste estudo é a troca de calor da água no misturador do chuveiro. Seria possível fazer uma modelagem dependendo da potência atual do chuveiro e das perdas para o sistema, obtendo assim uma precisão maior que pode ser utilizada nas contas do controle de temperatura, e assim obtendo uma curva mais suave quando a temperatura está próxima do desejado.

Como o dispositivo estudado controla a potência no chuveiro e independe das saídas hidráulicas, residências que possuem aquecimento solar vão precisar ligar os dois registros de água, fria e quente. Se o fluxo de água estiver com a temperatura abaixo do desejado, o controle vai ser ligado, e consequentemente o chuveiro começa a esquentar até chegar no valor selecionado. Isso gera um aumento do gasto de energia, mas uma diminuição no gasto de água, pois o aquecimento se dará de forma mais rápida. A parte positiva deste controle em tais residências é que durante o tempo em que a água quente leva para chegar ao chuveiro, o que é variável dependendo da distância do reservatório de água aquecida, o usuário tem mais

conforto em entrar na água quente com um tempo muito menor, já que o controle estará ativado.

Em relação à economia de energia e água, pode-se observar uma diminuição proporcional ao tempo em que o usuário levaria para regular a temperatura da água manualmente, em um chuveiro sem este dispositivo. Além da economia de energia e água, existe o benefício do usuário obter a temperatura da água automaticamente ao interagir com a interface usuário-máquina.

Considerando um cenário ecológico, uma redução mesmo que pequena de água e energia pode ser relativamente grande se computado a quantidade de residências em que é possível se obter essa diminuição no consumo. Com isso, existe a contribuição para os estoques de água doce do planeta, inclusive o não alagamento de áreas florestais para a construção de usinas hidrelétricas, preservando o meio-ambiente. O gasto de recursos naturais pelo ser humano precisa ser diminuído para a sustentabilidade do nosso planeta, mas isso é objeto para outro estudo.

Outro benefício é em relação aos custos para fazer tal circuito e controle. O valor gasto para um sistema como este é muito mais barato e facilmente adaptado em qualquer tipo de chuveiro em comparação ao custo de um chuveiro digital com um sistema de controle parecido.

Além disso, é possível perceber o quanto é possível automatizar o funcionamento de alguns aparelhos elétricos comumente utilizados nas residências a fim de economizar o tempo das pessoas. A automação residencial é um assunto de interesse de estudo entre estudantes das áreas de mecatrônica, automação e programação, já que é muito abordado atualmente. Este projeto é mais uma forma de automatizar uma funcionalidade com finalidade de proporcionar uma qualidade de vida melhor para o usuário e para a preservação do meio ambiente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, K., CHOPRA, N., **PID-Based Electronic Load Controller for Three-Phase Synchronous Generator.** Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 630. Springer, Singapore, 2020.

ALI, A., ARSHAD, AKHTAR, H. SIDDIQI, M. U. R., KAMRAN, M. **An Efficient and Novel Technique for Electronic Load Controller to Compensate the Current and Voltage Harmonics.** Engineering Science and Technology an International Journal, V. 23, p. 1042-1057, 2020.

ASTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T. **A frequency domain method for automatic tuning of simple feedback loops.** Las Vegas 1984.

ASTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning.** 2^a ed. United States of America 1995.

BEAUREGARD, B., **Arduino PID Library.** 2018. Disponível em: <https://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary/>. Acesso em novembro/2020.

BURTON, M., **Arduino Library for Maxim Temperature Integrated Circuits.** 2020. Disponível em: <https://github.com/milesburton/Arduino-Temperature-Control-Library>. Acesso em novembro/2020.

DIMITROV, K., **Arduino Thermometer with DS18B20.** 2016. Disponível em: <https://create.arduino.cc/projecthub/TheGadgetBoy/ds18b20-digital-temperature-sensor-and-arduino-9cc806>. Acesso em julho/2020

DORF, R. C., BISHOP, R.H. **Sistemas de Controle Modernos.** 8^a Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

ELLIOTT, R., **Zero Crossing Detectors and Comparators.** 2005. Disponível em: <https://sound-au.com/appnotes/an005.htm>. Acesso em novembro/2020.

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR, **6-Pin DIP Random-Phase Optoisolators Triac Driver Output.** 2000. Disponível em: <http://www.farnell.com/datasheets/97984.pdf>. Acesso em novembro/2020.

FONTENAY, R. **PID Regulation – Led Brightness Regulation with Arduino.** 2016. Disponível em: <https://www.fontenay-ronan.fr/pid-regulation-led-brightness-regulation-with-arduino/>. Acesso em agosto/2020.

GOODWIN, G. C., GRAEBE, S. F., SALGADO M. E. **Control System Design.** Valparaíso 2000.

HONEYWELL. **Potentiometers Line Guide.** 2014.

JOSEPH, C. L., BERNAL, S. **Modern Devices: The Simple Physics of Sophisticated Technology.** 1a Ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2016.

KOMATSU, W., MATAKAS JUNIOR, L., KAISER, W. **PEA-3487 Eletrônica de Potência I: Notas de Aula.** 2017.

MAXIM INTEGRATED, DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. 2019. Disponível em:
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Acesso em novembro/2019.

MAXIM INTEGRATED. Thermal Management Handbook. 2014.

MOHAN, N., UNDELAND, T. M., ROBBINS, W. P. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design.** 3a Ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2003.

NOVUS, Acionamento de Cargas por Ângulo de Fase e por Trem-de-pulso. 2011.
 Disponível em:
https://www.novus.com.br/site/default.asp?Idioma=55&TroncoID=053663&SecaoID=273506&SubsecaoID=0&Template=../artigosnoticias/user_exibir.asp&ID=539274#. Acesso em novembro/2020.

PERTENCE JÚNIOR, A. Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos. 6^a Ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

RENESAS, Digitally Controlled Potentiometer (XDCP™). 2019. Disponível em:
<https://www.renesas.com/br/en/www/doc/datasheet/x9c102-103-104-503.pdf>. Acesso em abril/2020.

SANJAYA, Y., FAUZI, A., EDIKRESNHA, D., MUNIR, M. M., KHAIRURRIJAL. Single Phase Induction motor Speed Regulation Using a PID Controller for Rotary Forcespinning Apparatus. Procedia Engineering, V.170, p. 404-409, 2017.

STOFFREGEN, P., OneWire Library. 2019. Disponível em:
https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_OneWire.html. Acesso em novembro/2020.

TEXAS INSTRUMENTS, LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers. 2000.
 Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358-n.pdf?ts=1606325563177>. Acesso em novembro/2020

VISHAY, Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection. 2010. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf>. Acesso em setembro/2020.

VISHAY, Ultrafast Plastic Rectifier. 2020. Disponível em:
<https://www.vishay.com/docs/88755/uf4001.pdf>. Acesso em novembro/2020.

YAZDKHASTI, P., DIDUCH, C. P., A PID controller for Direct Load Control of Thermostatically Controlled Appliances. 58th Conference on Decision and Control (CDC), p. 1913-1918. IEEE, France, 2019.